

# OPTMIZACIÓN DE LA CÁMARA DE AIRE DE UNA COLUMNA DE AGUA OSCILANTE

Ing. Jorge Alberto Rangel Carboney

Directores de tesis:

Dra. Maria Belem Arce Vazquez

Dr. Agustín Mora Ortega

2 de enero de 2019

**TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC**



**División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial**  
Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables

---

**OPTIMIZACIÓN DE LA CÁMARA DE AIRE DE UNA COLUMNA DE AGUA  
OSCILANTE.**

---

Tesis que para obtener el grado de

**Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables**

Presenta:

**Ing. Jorge Alberto Rangel Carboney**

Directores de Tesis:

**Dra. Maria Balem Arce Vazquez**

**Dr. Agustín Mora Ortega**



## Dedicatorias

A Dios por permitirme realizar este gran sueño.

A mi hija Aylin por ser un poderoso motor en mi vida que me impulsa siempre a seguir adelante y por ser una gran motivación.

A mi esposa Itzel por motivarme y siempre haber confiado en mi además de darme fuerzas ya que ella fue gran parte de este objetivo y sueño cumplido.

A mis padres por siempre haber estado en todo momento, por haberme apoyado y motivado a cumplir mis sueños, y por su ejemplo de esforzarse al máximo para cumplir mis sueños.

A mis hermanas por todo su apoyo, porque a pesar de todo siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas.

A mi abuelita Reme, tía Olivia y tío Gerardo por todo su apoyo y confianza, además de siempre haber estado al pendiente de mi.

A mis suegros por el apoyo que siempre me han dado para lograr concluir este sueño. A toda mi familia que es la que más quiero.

## Agradecimientos

Quiero agradecer al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec por abrirme las puertas para realizar los estudios de posgrado.

A la Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por la beca otorgada para los estudios de maestría.

Gracias a mis asesores de tesis: la Dra. Maria Belem Arce Vazquez y el Dr. Agustín Mora Ortega, por todos sus conocimientos compartidos además de su enseñanza que fue un gran pilar de este proyecto. También por su paciencia, motivación y consejos para el desarrollo de este proyecto.

Gracias al Dr. Martín Salazar Pereyra por sus conocimientos impartidos que siempre fueron de gran ayuda y sus consejos para seguir adelante, al M.C. Carlos Aguilar Anastacio y al M.C. Wenceslao Bonilla Blancas por su apoyo y enseñanza a través de esta gran etapa.

Gracias a mi amigos del laboratorio J-201: Sergio Alexis Gutierrez Eudave por haberme apoyado en toda esta gran etapa de mi vida, Luis, Pepe, Andres, Daivid, Salvador, Enrique, Ernesto, Andres, Carlitos, Ochoa, David jr, inge. David y Ladislao, por su gran amistad y ayuda a lo largo de esta gran etapa.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. Motivación</b>	<b>13</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>15</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	15
2.2. Objetivos Específicos . . . . .	15
<b>3. Introducción</b>	<b>17</b>
3.1. Antecedentes . . . . .	17
3.2. Convertidores de energía del oleaje. . . . .	17
3.3. Clasificación de dispositivos dependiendo la posición respecto a la costa . . . . .	18
3.3.1. Dispositivos cerca de la costa (nearshore) . . . . .	18
3.3.2. Dispositivos mar adentro (offshore) . . . . .	19
3.3.3. Dispositivos en la costa (onshore) . . . . .	21
<b>4. Formulación</b>	<b>25</b>
4.1. Ecuaciones de gobierno . . . . .	25
4.2. Análisis adimensional . . . . .	28
4.3. Condiciones de frontera . . . . .	29
<b>5. Resultados</b>	<b>31</b>
5.1. Efectos del orificio de descarga de la cámara de aire. . . . .	37
5.2. Efectos de la pared vertical sumergida. . . . .	39
5.3. Efectos del parámetro de propagación de la onda a la OWC. . . . .	41
5.4. Efectos de $\theta$ aplicando como flujo compresible o incompresible. . . . .	43
5.5. Incremento de la potencia de la cámara de aire de la OWC, variando los parámetros $\theta$ , $\mu$ y $\Gamma$ . . . . .	45
5.6. Eficiencia capturada de la OWC . . . . .	47
<b>6. Conclusiones</b>	<b>51</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Potencial energético del oleaje en el planeta [1]. . . . .	17
3.2. Clasificación de sistemas dependiendo su orientación . . . . .	18
3.3. Convertidor de energía Powerbuoy . . . . .	19
3.4. Convertidor de energía Aquabuoy . . . . .	20
3.5. Convertidor de energía Pelamis . . . . .	21
3.6. Dispositivo Wave Dragon . . . . .	21
3.7. Planta Toftestallen instalada en Noruega . . . . .	22
3.8. Dispositivos OWC construidas en la costa. . . . .	23
4.1. Vista de perfil del modelo físico en estudio. . . . .	25
4.2. Vista del perfil del modelo de estudio. La línea punteada amarilla representa el volumen de control $CV$ y la línea punteada roja representa la superficie de control $CS$ . . . . .	26
4.3. Condiciones de frontera . . . . .	30
5.1. Mallado del sistema físico en estudio. . . . .	31
5.2. Diagrama de flujo del análisis de Dinámica de Fluidos Computacionales, aplicando variaciones en la longitud del orificio de salida del aire con respecto al ancho de la estructura de la OWC. . . . .	32
5.3. Diagrama de flujo del análisis de Dinámica de Fluidos Computacional aplicando variaciones en el parámetro adimensional $\Gamma$ . . . . .	33
5.4. Diagrama de flujo del análisis de Dinámica de Fluidos Computacional aplicando variaciones en el parámetro adimensional $\mu$ . . . . .	34
5.5. Campo vectorial de la velocidad del aire dentro de la cámara en diferentes tiempos con parámetros de $\theta = 10$ , $\mu=0.3$ , $\Gamma = 1$ para $t=(4, 7, 36, 41)$ s. . . . .	35
5.6. Campo vectorial de la presión manométrica dentro de la cámara en diferentes tiempos con parámetros de $\theta = 10$ , $\mu = 0,3$ , $\Gamma = 1$ . con $t(= 4, 7, 36, 41)$ s . . . . .	36
5.7. Campo vectorial de la velocidad del agua dentro de la OWC con parámetros de $\theta = 10$ , $\mu = 0,3$ , $\Gamma = 1$ y $t=(4, 7, 36, 41)$ s. . . . .	37
5.8. Variación de la velocidad de descarga (m/s) en función del tiempo (s), con $\Gamma=1$ , $\mu=0.3$ , $Ai=0.03m$ , $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes aperturas del orificio $\theta(= 5, 10, 15, 20$ y $25)$ . . . . .	38
5.9. Variación de la presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s), con $\Gamma=1$ , $\mu=0.3$ , $Ai=0.03m$ , $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes aperturas del orificio $\theta(= 5, 10, 15, 20$ y $25)$ . . . . .	39
5.10. Variación de la velocidad de descarga (m/s) en función del tiempo (s), con $\Gamma=1$ , $\theta=20$ , $Ai=0.03m$ , $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes alturas de la pared sumergida en relación a la altura media del agua $\mu(= 0.14, 0.25$ y $0.50)$ . . . . .	40
5.11. Variación de la presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s), con $\Gamma=1$ , $\theta=20$ , $Ai=0.03m$ , $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes alturas de la pared sumergida en relación a la altura media del agua $\mu(= 0.14, 0.25$ y $0.50)$ . . . . .	41
5.12. Variación de la velocidad de descarga (m/s) en función del tiempo (s), con $\mu=0.3$ , $\theta=20$ , $Ai=0.03m$ , $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes parámetros de propagación de la onda $\Gamma(= 0.25, 0.50, 0.75$ y $1)$ . . . . .	42
5.13. Variación de la presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s), con $\mu=0.3$ , $\theta=20$ , $Ai=0.03m$ , $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes parámetros de propagación de la onda $\Gamma(= 0.25, 0.50, 0.75$ y $1)$ . . . . .	43

5.14. Presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s) variando flujo compresible e incompresible para $\theta=(50, 80 \text{ y } 100)$ . . . . .	44
5.15. Potencia total de la OWC en función del tiempo con $\mu=0.3$ , $Ai=0.03$ , $\omega=0.448$ , $\Gamma=1$ , como constantes para diferentes parámetros de apertura del orificio de salida del aire $\theta(=5, 10, 15, 20 \text{ y } 25)$ . . . . .	45
5.16. Potencia total de la OWC en función del tiempo con $\theta=20$ , $Ai=0.03$ , $\omega=0.448$ , $\Gamma=1$ , como constantes para diferentes parámetros de altura de la pared sumergida en relación con la altura media del agua $\mu(=0.14, 0.25 \text{ y } 0.50)$ . . . . .	46
5.17. Potencia total de la OWC en función del tiempo con $\theta=20$ , $Ai=0.03$ , $\omega=0.448$ , $\mu=0.3$ , como constantes para diferentes parámetros de propagación de la onda $\Gamma(=0.25, 0.50, 0.75 \text{ y } 1)$ . . . . .	47
5.18. Comparación de la eficiencia de captura para diferentes parámetros de apertura del orificio de salida $\theta(=5, 10, 15, 20 \text{ y } 25)$ en función del parámetro de propagación de la onda $\Gamma$ para los parámetros constantes de $\mu=0.3$ , $\omega=0.448$ , y $Ai=0.03m$ . . . . .	48
5.19. Comparación de la eficiencia de captura para diferentes parámetros de propagación de la onda $\Gamma(=0.25, 0.50, 0.75 \text{ y } 1)$ en función del parámetro de apertura del orificio de salida $\theta$ para los parámetros constantes de $\mu=0.3$ , $\omega=0.448$ , y $Ai=0.03m$ . . . . .	49



# Nomenclatura

## Letras latinas

$2H$	—	ancho de la estructura de la columna de agua oscilante
$2l$	—	ancho del orificio de descarga de la cámara de aire
$c$	—	celeridad de la onda
$dA$	—	diferencial de área
$dV$	—	diferencial de volumen
$e$	—	energía específica total por unidad de masa
$g$	—	aceleración de la gravedad
$hc$	—	altura de la estructura de la OWC
$m$	—	masa
$Ma$	—	número de Mach
$OWC$	—	Oscillation Water Column
$P$	—	presión manométrica
$POWC$	—	potencia de la OWC
$q$	—	caudal de aire instantaneo a traves del orificio de la cámara de aire
$t$	—	tiempo
$\tilde{u}$	—	energía interna
$v_d$	—	velocidad de descarga a traves del orificio
$V$	—	volumen
$W$	—	trabajo realizado por el sistema
$WEC$	—	Wave Energy Converter
$U$	—	velocidad promedio en el eje transversal
$\tilde{n}$	—	vector unitario
$z$	—	coordenada vertical

## Letras griegas

$\theta$	—	parámetro adimensional $\theta = H/l$
$\Gamma$	—	parámetro geométrico adimensional $\Gamma = 2H/b_0$
$\mu$	—	parámetro adimensional $\mu = w_c/h$
$\rho$	—	densidad del agua
$\rho_a$	—	densidad del aire
$\eta_w$	—	variación de la superficie del oleaje
$\eta_c$	—	variación de la superficie del agua dentro de la OWC
$\sigma$	—	eficiencia de la Owc

## Subindices

$SC$	—	superficie de control
$VC$	—	volumen de control

## Abstract

In this work we analyze the aerodynamics of the air chamber of an Oscillating Water Column. Starting from the mass conservation equation and applying the Reynolds transport theorem to the first law of thermodynamics, we obtained the mathematical model that describes the thermodynamic behavior inside the air chamber of the OWC. In order to reduce the number of possible combinations of physical variables, we obtain the mathematical model expressed in dimensionless variables. The effect of geometrical, kinematic and dynamic parameters on wave motion and oscillating water column is identified, and these effects are discussed on the efficiency of this device. The main objective of this study is to optimize the geometry and dimensions of the power converter to obtain the maximum power available in a progressive wave with constant period and wavelength. The numerical simulation is done through the use of COMSOL MULTIPHYSICS commercial software. The results of the simulation show that the exit opening of the air chamber and the immersion depth of the front wall of the device have a significant impact on the performance of the device.

## Resumen

En este trabajo se analiza la aerodinámica de la cámara de aire de una Columna de Agua Oscilante. Partiendo de la Ecuación de conservación de masa y aplicando el Teorema de transporte de Reynolds a la primera ley de la Termodinámica se obtuvo el modelo matemático que describe el comportamiento termodinámico dentro de la cámara de aire de la OWC. Con la finalidad de reducir el número de combinaciones posibles de las variables físicas, se obtiene el modelo matemático expresado en variables adimensionales. Se identifica el efecto que tienen los parámetros geométricos, cinemáticos y dinámicos en el movimiento del oleaje y de la columna de agua oscilante, se discuten dichos efectos sobre la eficiencia de este dispositivo. El objetivo principal de este estudio es optimizar la geometría y las dimensiones del convertidor de energía para obtener la máxima potencia disponible en una onda progresiva con período y longitud de onda constantes. La simulación numérica se realiza mediante el uso del software comercial COMSOL MULTIPHYSICS. Los resultados de la simulación muestran que la apertura de salida de la cámara de aire y la profundidad de inmersión de la pared frontal del dispositivo tienen un impacto significativo en el rendimiento del dispositivo.



# Capítulo 1

## Motivación

En la actualidad, la gran demanda energética que se ha presentado en el planeta, ha ocasionado un mayor interés en el estudio de energías alternas renovables y limpias. Con ello se han realizado numerosos esfuerzos en la investigación de dichas energías tales como: energía solar, eólica, geotérmica y energía marina, además del abasto de energía eléctrica en las zonas aisladas y cercanas de la costa. Para el desarrollo de este proyecto centraremos nuestra atención en la energía marina, específicamente en la energía de las olas (energía undimotriz), ya que el oleaje es un fenómeno que se puede presentar en cualquier costa del planeta, variando su amplitud y periodo de oscilación, además de que es una energía inagotable y limpia. Por ello una de las motivaciones para desarrollar este proyecto es el potencial energético del océano en México, ya que tiene alrededor de 11,000 kilómetros de costas, sin embargo la baja frecuencia de oscilación del oleaje que se presenta en las costas del país representa un reto para realizar la transformación de la energía. Uno de los principales dispositivos que busca evitar este problema, mediante el uso de turbinas de aire de alta velocidad son las Columnas de Agua Oscilante o por sus siglas en inglés OWC (Oscillation Water Column). Esto es gracias a que la columna de agua dentro del convertidor de energía del oleaje (WEC, Wave Energy Converter, por sus siglas en inglés) puede alcanzar la resonancia si se manipulan las variables geométricas adecuadas. Por otro lado, sí, el orificio de salida disminuye, el aire sobre la superficie libre del líquido interna estaría sujeta a una mayor presión, debida al movimiento ascendente de la superficie libre. Por lo que al variar el tamaño del orificio, la cantidad de amortiguación debido a los efectos viscosos puede ser alterada y por consiguiente, se puede aprovechar una mayor cantidad de energía del tren de ondas incidente.



# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Analizar la aerodinámica de la cámara de aire de forma numérica y analítica para maximizar el aprovechamiento de la energía cinética del aire.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Obtener el modelo matemático de la cámara de aire.
- Resolver de forma numérica y analítica el modelo matemático.
- Hacer un estudio paramétrico de la cámara de aire.
- Realizar el análisis de la potencia útil del dispositivo transformador de energía.
- Mejorar la eficiencia de la columna de agua oscilante.





# Capítulo 3

## Introducción

### 3.1. Antecedentes

Actualmente los principales factores que han impulsado al desarrollo de sistemas de energías renovables han sido el calentamiento global, además de los altos precios del petróleo y otros combustibles fósiles. Entre los recursos energéticos renovables con mayor interés para su estudio hoy en día son energía: solar, eólica, geotérmica y la energía oceánica, en particular la energía de las olas tiene el potencial de proporcionar una cantidad sustancial como una nueva fuente de energía renovable en todo el mundo. En el tema de energía oceánica, se han iniciado un gran número de investigaciones para diseñar, probar e implementar varios tipos de convertidores de energía del oleaje (WEC). De la energía de las olas, solo una pequeña parte se utiliza para fines comerciales como la generación de energía eléctrica. El potencial energético de la energía undimotriz [2], se muestra en la Fig. 3.1, en donde se observa que en México se puede tener un aprovechamiento de hasta 30kW/m.

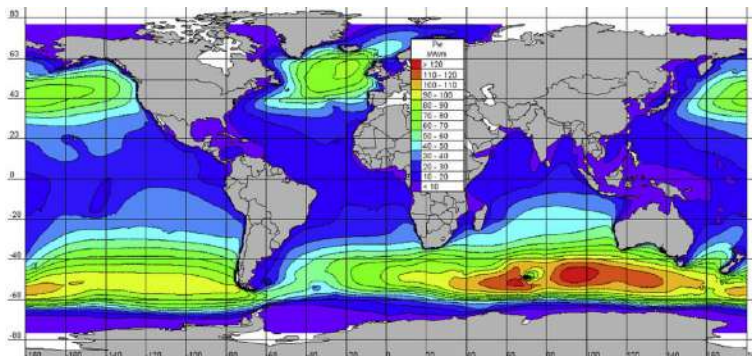


Figura 3.1: Potencial energético del oleaje en el planeta [1].

### 3.2. Convertidores de energía del oleaje.

Los dispositivos de captación del oleaje se clasifican de acuerdo a la posición tomando como punto de referencia la costa: 1) En la costa (onshore), 2) Cerca de la costa (nearshore) (10 a 40m), 3) Mar adentro (offshore) (mayor a 50m). Para describir la clasificación de los dispositivos anteriores se deben tomar en cuenta ciertas características:

\*Dependiendo la orientación respecto al oleaje y forma [3].

- **Absorbedores puntuales:** Son estructuras de tamaño reducido en comparación al oleaje incidente. Generalmente se colocan varios dispositivos agrupados siguiendo una línea. Concentran el oleaje en un punto[4] [5].

- **Atenuadores:** Tienen forma alargada y se colocan paralelos a la dirección de avance de la ola. Captan la energía de manera progresiva. Las fuerzas a ambos lados de la estructura se compensan, de manera que requieren un sistema de amarre menos resistente que en el caso de los totalizadores.

- **Totalizadores o terminadores:** de forma alargada, se colocan perpendiculares a la dirección de avance de las olas. Requieren un sistema de amarre más resistente que los atenuadores.

\*Dependiendo el principio de funcionamiento y de captación de energía. Existen dos grandes grupos:

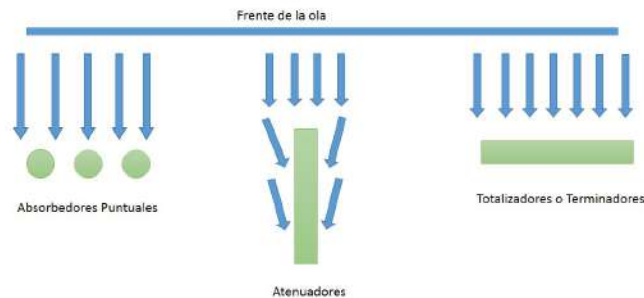


Figura 3.2: Clasificación de sistemas dependiendo su orientación

**Sistemas pasivos o estáticos:** son aquellos en los que la estructura está inmóvil durante todo el proceso de conversión, de modo que la energía se genera sólo con el propio movimiento de las partículas de agua. Un ejemplo es el sistema TAPCHAN.

**Sistemas activos u oscilantes:** aprovechan el movimiento relativo entre las partes fijas y las móviles del dispositivo. Existen dos tipos: -El oleaje actúa directamente sobre el cuerpo móvil. La conversión primaria se basa en el movimiento relativo entre dos cuerpos. - El oleaje actúa sobre una interfaz agua-aire, de modo que la ola desplaza al aire, que desplaza a su vez al cuerpo móvil.

### 3.3. Clasificación de dispositivos dependiendo la posición respecto a la costa

#### 3.3.1. Dispositivos cerca de la costa (nearshore)

Son aquellos dispositivos situados a una distancia máxima de 500 metros de la costa y a una profundidad de entre 20 y 30 metros, pueden estar apoyados en el fondo o ser flotantes. Igual que en el caso de los aparatos en la costa, presentan la ventaja de tener un costo de instalación y mantenimiento menor que en aguas profundas y el transporte de la energía a la red es sencillo. Disponen de un potencial energético menor que el explotable mar adentro, aunque algo mayor que el de los tipo onshore. El mayor inconveniente es, además del impacto visual, que su instalación implica la modificación de la dinámica costera [6].

##### Oyster (UK)

Existe un dispositivo a escala real desarrollado en el norte de Escocia. Trabaja con un módulo anclado al fondo marino que con el movimiento oscilatorio mueve unos pistones, que a su vez entregan el agua a presión a una unidad de transformación hidroeléctrica ubicada en la costa. Trabaja a profundidades de 10 a 12 metros, dando una potencia máxima de entre 300 y 600 kW [3].

##### Waveroller

Este sistema desarrollado por AW Energy Oy mediante modelos y a escala de laboratorio entre los años 1999 y 2004. En 2005 se construyó un prototipo a semiescala (1:3) que probó la viabilidad del dispositivo. En la actualidad existe un prototipo a escala real instalado en Peniche, Portugal. Consiste en una placa anclada al fondo del mar por la parte inferior, la cual se mueve por el movimiento oscilatorio de las olas en el fondo. La energía cinética se transmite a un pistón y se transforma a energía eléctrica mediante un generador o bien con un sistema hidráulico cerrado combinado con un conjunto turbina generador. Proporciona una potencia nominal de 13 kW por placa (se disponen de 3 a 45 placas). Puesto que se encuentra sumergido, no presenta problemas de impacto visual y acústico [3].

##### Mighty Whale

El dispositivo fue desarrollado en Japón en 1998, y se puso en funcionamiento en mayo del 2002 en la bahía de Gocazo. Se basa en la obtención de energía proporcionando una zona abrigada como protección a la costa. Es una estructura de 50 x 30 metros capaz de generar con un frente de 30m y 40m de longitud una potencia de 110kW, con una eficacia del 60 % aproximadamente. El principio por el cual genera la electricidad es debido a las presiones y succiones de aire que provoca la agitación del oleaje [3].

### 3.3.2. Dispositivos mar adentro (offshore)

La principal ventaja que representan respecto a los anteriores dispositivos es que en aguas profundas (mayor a 40 m) existe un potencial energético mayor ya que el oleaje todavía no ha experimentado pérdidas [7]. Sin embargo, al encontrarnos a profundidades mucho mayores, aparecen otras dificultades: Coste y complejidad de la instalación elevados, difícil acceso al dispositivo para mantenimiento y reparación, el sistema de amarre y la estructura en general debe resistir grandes esfuerzos, interferencias con el tráfico marítimo. Se clasificarán según su orientación respecto al oleaje: 1) Absorbedores puntuales, 2) Atenuadores, 3) Totalizadores o terminadores.

#### 1) Absorbedores puntuales

##### Archimedes wave swing (AWS)

Se trata de un sistema de conversión que se encuentra totalmente sumergido entre los 40 y 100 m de profundidad, de manera que el impacto visual es prácticamente nulo. Está formado por dos cilindros: el primero se encuentra fijado al fondo y el otro hace la función de flotador, desplazándose verticalmente debido a la incidencia del oleaje. Cuando la ola pasa por encima el flotador se contrae o expande, según si pasa la cresta o el valle de la ola, para tratar de equilibrar las presiones entre el interior y exterior. El movimiento relativo entre el flotador y la parte inferior fija se transforma en electricidad mediante un sistema hidráulico y un conjunto motor generador. La parte fija se encuentra anclada al fondo por un bloque de hormigón [5].

##### Powerbuoy

Tecnología desarrollada por OPT (Ocean Power Technologies) de Estados Unidos. El sistema consiste en aprovechar el movimiento vertical y pendular del oleaje a través de una boya de unos 2 a 5 metros de diámetro abierta por la parte inferior. Las boyas obtienen la energía mediante un sistema hidráulico que aprovecha el movimiento relativo entre el flotador y el mástil de la boya [8]. El sistema bombea un fluido (aceite) a alta presión que a su vez acciona un generador eléctrico. La energía obtenida se traslada a la costa mediante un cable por el fondo marino [9]. En caso de tener temporales extremos, el sistema se desactiva por precaución y una vez se ha vuelto a la normalidad, el sistema vuelve a activarse y a producir energía. Se han llevado a cabo algunos proyectos situados en el Atlántico y en el Pacífico: Oahu (Hawai), proyecto desarrollado entre 2004 y 2007 con el objetivo de utilizar la energía del oleaje para las bases de la marina norteamericana. El parque de olas estaba situado a una profundidad de 30 metros con una potencia de hasta 1 MW. Atlantic City, New Jersey Parque en operación desde octubre del 2005 para demostrar la viabilidad del sistema de captación energética en el estado de Nueva Jersey. La boya es de 5 metros de diámetro y 14 metros de longitud. Se encuentra situada a una profundidad de 18 metros con una potencia nominal de 40 kW. Santoña (España) Proyecto se empezó a desarrollar en 2006 para Iberdrola S.A. con el objetivo de evaluar la viabilidad del sistema en la costa norte de España. El parque se sitúa a 50 metros de profundidad e inicialmente se puso una potencia nominal de 1.35 MW.

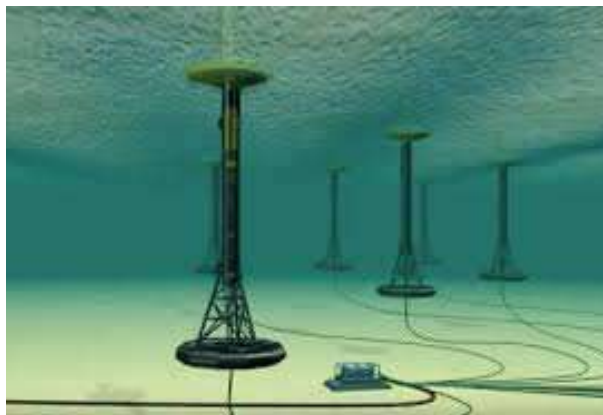


Figura 3.3: Convertidor de energía Powerbuoy

##### Aquabuoy

Sistema desarrollado por Aquaenergy Group. Consta de una boya flotante que transforma el movimiento de subida y bajada provocado por el oleaje para transmitirlo a un pistón. Éste está unido a dos mangueras flexibles que funcionan como bombas de agua, impulsando el agua a presión a través de un tubo hacia el acumulador que se encuentra en la parte superior del dispositivo. El interior de la boya aloja un sistema turbina generador que produce la electricidad. Un dispositivos basado es sistema se ubica en la Bahía de Maca (EEUU), este proyecto pretende construir una planta de 1 MW de potencia nominal para abastecer a 150 casas en la bahía de Neah, produciendo

un total de 1500 MWh/año. Fue impulsado debido a que presentaba condicionantes favorables: profundidad cerca de la costa, buen clima de oleaje y demanda energética en la zona. Una boya piloto se instaló en 2003 a una profundidad de más de 50 metros y diámetro y longitud de 6 y 30 metros respectivamente. La potencia máxima de dicho dispositivo fue de 250kW [3].



Figura 3.4: Convertidor de energía Aquabuoy

### FO3- FRED OLSEN

Sistema noruego que consiste en una plataforma flotante de fibra de vidrio reforzado que aloja varias boyas que trabajan en dos direcciones. La extracción de energía se hace mediante cilindros y motores hidráulicos. El modelo a escala real consistiría en una plataforma (33x33x25) con 21 boyas, de potencia total de 1,5 a 2,5 MW situada a una profundidad de aproximadamente 40 a 50 metros. Algunos de los dispositivos instalados son: Brevik, Noruega, y es un prototipo a escala 1:3 instalado en 2005 con dimensiones de plataforma 12x12 metros [5].

#### Wavebob

Diseñado por la empresa británica Wavebob Ltd, consiste en un sistema de extracción hidráulico que absorbe los movimientos verticales. Está diseñado para colocar varios dispositivos en filas a una profundidad mayor de 70 metros y tener un coste operativo y de mantenimiento bajo. Cada unidad comercial consta de una estructura flotante de concreto con un sistema hidráulico de aceite a presión, que transmite a velocidad constante la energía a los motores que, a su vez accionan tres alternadores de 0.5MW. En los últimos años se ha estudiado el modelo en laboratorio y a escala, con un prototipo 1:4 probado en Galway, Irlanda en marzo del 2006 [3].

#### Hose Pump

Dispositivo sueco que consiste en una manguera elástica que con el movimiento se estrecha y ensancha, situada entre un flotador en la parte superior y una estructura de anclaje. Con la subida y bajada del flotador la manguera se estrecha, proporcionando presión al agua que alimenta un sistema turbina generador [3].

### 2) Atenuadores

#### Pelamis wave power

Sistema desarrollado por la empresa británica Pelamis Wave Power Ltd, anteriormente conocida como Ocean Power Delivery Ltd. La idea partía de uno de los primeros dispositivos evolucionando para dar paso a nuevos sistemas como la tecnología Pelamis [10]. El dispositivo Pelamis está formado por una estructura cilíndrica semisumergida cuyo eje está orientado paralelamente a la dirección de propagación del oleaje. Se encuentra articulada en varios puntos que conforman nodos móviles con dos grados de libertad: vertical y horizontal. El movimiento relativo entre las partes articuladas acciona un sistema hidráulico de 4 pistones que alimenta un depósito a presión que, a su vez, actúa sobre un generador eléctrico. Se encuentra anclado al fondo por un sistema de pesos y flotadores que impide que vaya a la deriva sin restringir la oscilación del artefacto. Aguacadoura, Portugales un proyecto iniciado en 2005 y consiste en tres dispositivos Pelamis situados a 5km de la costa norte de Portugal con capacidad de 2.25 MW en total (cada uno de 750 kW). Es el primer parque de olas con pretensiones comerciales, se quiere ampliar en un futuro hasta los 20MW con la compra de 28 convertidores más. Actualmente se encuentra operativo [11].

#### McCabe Wave Pump

Consiste en tres pontonas de acero, dos laterales y una central, que se mueven relativas al movimiento de las olas. La energía se extrae de la rotación de las pontonas mediante bombas hidráulicas montadas entre la pontona central y las dos laterales. En primera instancia se contruyó para desalinizar agua, aunque también puede usarse para la producción de electricidad. En 1996 se investigó un proyecto situado en la costa de Irlanda de 40 m de largo [3].



Figura 3.5: Convertidor de energía Pelamis

### 3) Totalizadores o terminadores

El dispositivo Wave Dragon Sistema desarrollado por la compañía danesa Wave Dragon ApS. Empezó a estudiarse en 1998 a partir de modelos numéricos y ensayos en laboratorio, con el objetivo de mejorar el sistema [12].



Figura 3.6: Dispositivo Wave Dragon

Se trata de un dispositivo elevado de 2 a 3 metros sobre el nivel del mar, formado por un reflector de dos brazos que concentra el oleaje hacia una rampa. A través de dicha rampa se conduce el agua a un depósito situado a mayor altura con un desagüe y un equipo de turbinas Kaplan de baja presión. Las mejoras introducidas a lo largo de los años se han centrado en la forma del sistema reflector y sección de la rampa.

#### 3.3.3. Dispositivos en la costa (onshore)

Presentan la ventaja de tener un coste de instalación y mantenimiento menor que el de otro tipo de dispositivos, puesto que son de fácil acceso, se encuentran cimentadas sobre roca y el transporte de la energía a la red presenta menos impedimentos. Sin embargo, disponen de un potencial energético menor que el colocado mar adentro, aunque se pueda ver compensado por efectos de concentración de energía por refracción o difracción. Un solo convertidor puede ser suficiente para cubrir determinadas necesidades a pequeña escala. En un lugar remoto o en una isla con una comunidad reducida [13].

**Sistema TAPCHAN.** Consta de una estructura en canal que se hace cada vez más estrecho de forma gradual, desde el nivel medio del mar hasta un depósito más elevado. A medida que el oleaje se propaga por el canal, la altura de ola se amplifica hasta que sobrepasa la estructura y entra al depósito de reserva, el cual proporciona un flujo continuo de agua a una turbina tipo Kaplan [14]. Su funcionamiento se ha comprobado solo con un único prototipo, el cual parece ser competitivo pero no ha sido posible su comercialización a gran escala. La viabilidad parece estar muy condicionada por la ubicación del dispositivo, siendo conveniente que cerca de la costa haya suficiente profundidad y sin mareas de más de un metro de altura. Las obras necesarias deben ser lo mas pequeñas posibles para no afectar a medio ambiente ni el coste. Un ejemplo de este dispositivos es el Toftestallen y es un prototipo promovido por Norwave A.S. e instalado en Toftestallen (Noruega) finalizado en 1985. Su potencia máxima es de

400 kW, consta de un canal de 170 m de longitud con un desnivel de 4 m por encima del nivel medio del mar [7].



Figura 3.7: Planta Toftestallen instalada en Noruega

### Pendulor

Es un dispositivo de captación que se puede situar tanto en la costa como cerca de ella, basado en un péndulo oscilante movido por el oleaje. Japón ha sido el país pionero en el desarrollo de este tipo de tecnología, llevando a cabo modelos a escala real. Consiste en una cámara de concreto armado de forma rectangular con un lado abierto al mar [15]. En éste lado se dispone de una compuerta de acero articulada en la parte superior que recibe el empuje del oleaje. El movimiento oscilatorio de dicha compuerta acciona una bomba hidráulica conectada a un generador. El cajón rectangular es de una profundidad aproximada de un cuarto de la longitud de la ola, de manera que produce un movimiento estacional sobre la placa metálica. Su funcionamiento óptimo se producirá cuando la frecuencia del oleaje coincida con la natural del péndulo. Mururoa, Japón es un sistema desarrollado por JAMSTEC con prototipo instalado en el puerto de Mururoa. Presenta una eficiencia total del 55 %. Consta de un cajón de 8 m de altura con dos cámaras de 2.3 x 7.5 m, el péndulo tiene una altura de 7.5 m y un ancho de 2m. Su potencia máxima es de 15 kW [3].

### OWC (Oscillating water column)

El presente trabajo fue desarrollado con base a la Columna de Agua Oscilante o por sus siglas en inglés OWC. Las OWC constan de una estructura cilíndrica y hueca, se encuentra parcialmente sumergida, permitiéndole tener una conexión directa con el mar; parte de su interior está ocupado por aire. El movimiento del oleaje se traduce en presión sobre el aire situado en el interior, que se expande y comprime accionando una turbina que a su vez acciona el generador. La estructura es un tubo de gran diámetro en la zona de contacto con el agua, y a medida que se acerca a la turbina se va estrechando con el fin de amplificar la presión y que el sistema turbina - generador funcione correctamente [16]. Los rendimientos suelen ser del 30-50 % y pueden estar instalados en estructuras fijas o en estructuras móviles o flotantes, o bien sobre las rocas de la costa aprovechando instalaciones portuarias. La potencia a la que operan oscila entre los 100 y 500 KW. Uno de los dispositivos OWC que actualmente opera es LIMPET (Land Installed Marine Powered Energy Transformer), dispositivo que fue desarrollado por la compañía británica WaveGen Ltd. en diciembre del 2000 en la Isla de Islay en la costa oeste de Escocia, donde existe un flujo de energía disponible de entre 15 y 25 KW/m [7]. Consta de dos turbinas tipo Wells cada una de las cuales tiene una capacidad instalada de 250 kW. Dicho dispositivo se encuentra conectado a la red, y ha demostrado ser estructuralmente resistente a condiciones extremas de temporal con un mantenimiento mínimo y en la actualidad sirve como base experimental para desarrollar nuevas tecnologías. El diseño consta de tres compartimentos iguales y cuadrados inclinados 40 grados respecto a la horizontal que actúan como columna de agua. Se ha optimizado para reducir el impacto visual y para ser de fácil instalación y mantenimiento. Otro dispositivos OWC instalado es la

Pico OWC , y está situada en la isla de Pico en Azores, fue construida en 1998 sobre un macizo rocoso a 8 metros de profundidad. Aunque en un principio no operaba correctamente debido a problemas técnicos y financieros, y finalmente de 2003 a 2006 se llevó a cabo un proyecto para recuperar el sistema. La potencia máxima de salida es de 400 KW, se encuentra equipada con una turbina tipo Wells, con una cámara de 12x12 metros. Actualmente cubre parte de la demanda energética de la isla.



(a) OWC Limpet en Islay



(b) OWC Pico en Azores

Figura 3.8: Dispositivos OWC construidas en la costa.

Yoshio Masuda (1925-2009), un oficial de la marina japonesa, puede ser considerado como el padre de la tecnología moderna de energía de las olas. Yoshio desarrolló una boya de navegación alimentada por energía de las olas con el nombre de Kaime, equipada con una turbina de aire, que fue en realidad lo que más tarde se conoció como OWC flotante [17]. Las olas oceánicas son un importante recurso de energía renovable ya que si se aprovecha de manera adecuada, puede contribuir de manera significativa al suministro de energía eléctrica de los países con costas. Una amplia variedad de tecnologías se han propuesto, estudiado, y en algunos casos probado a tamaño y condiciones reales. El proceso mecánico de absorción de energía de las ondas requiere una interfaz móvil que implica: 1) un cuerpo móvil parcial o totalmente sumergido y / o 2) una interfaz de agua y aire móvil sometida a una presión que varía en el tiempo. En este último caso es una Columna de Agua Oscilante (OWC). La principal ventaja de la OWC frente a la mayoría de los demás WECs es su simplicidad: la única parte móvil del mecanismo de conversión de energía es el rotor de una turbina, situada por encima del nivel del agua, girando a una velocidad relativamente alta y dirigiendo directamente un convertidor convencional generador eléctrico. Las OWC son una clase importante de convertidores de energía de onda, posiblemente la clase que ha sido estudiada más extensamente y con el mayor número de prototipos hasta ahora desplegados en el mar. En casi todas las OWC, el aire fluye alternativamente de la cámara a la atmósfera y hacia atrás, aunque en algunos conceptos el flujo está en circuito cerrado. A menos que se utilicen válvulas rectificadoras, lo que se considera poco práctico excepto en dispositivos pequeños como boyas de navegación, las turbinas son auto rectificadoras, es decir, su dirección de rotación permanece sin cambios independientemente de la dirección del flujo de aire. Se han desarrollado varios tipos de turbinas especiales con el fin de mejorar el rendimiento de los dispositivos OWC, aparte de los nuevos diseños para turbinas de aire y mecanismos de control, los intereses recientes de investigación se centran en diversas modificaciones en el diseño geométrico de los dispositivos. Algunos de los conceptos que se están explorando son la imposición de efectos de fondo de mar en escalones [18], la adición de puertos [19] y paredes reflectantes combinadas [20, 21] con OWC de varias cámaras. La introducción de un puerto frente a la entrada del OWC haría que las ondas fueran enfocadas como resultado de refracción, reflexión y difracción, lo que a su vez incrementaría el ancho de banda de frecuencia de la extracción de energía útil del dispositivo y podría ser reconocido como una solución para aumentar el rendimiento de las OWC.

Al saber de todos los dispositivos de captación del oleaje, se han realizado numerosas investigaciones de acuerdo a estos temas, generalmente los dispositivos de columna de agua oscilante (OWC) se modelan como sistemas simples que contienen aire seco ideal. Sin embargo, es probable que se presenten altos niveles de humedad en un dispositivo prototipo abierto al mar, particularmente en climas cálidos como los que prevalecen en las latitudes más bajas. En un documento de E. Medina López [22], implementó un modelo de gas real para tener en cuenta las variaciones de humedad dentro de una cámara OWC. Utilizando un índice adiabático modificado, se derivan expresiones teóricas para las variables de estado termodinámico, que incluyen entalpía, entropía y calor específico. Este modelo se validó con datos experimentales y se muestra que proporciona un mejor acuerdo que el que se obtiene al suponer el gas ideal [22].

En otro documento de Nader Dizadji [23] presentó a través de una extensa investigación experimental, se investigaron varios diseños geométricos de un sistema OWC y se obtuvo la configuración optimizada para la obtención de energía máxima. Para diversas geometrías de la cámara, con la ayuda de un rotámetro de aire y un tubo de Pitot equipado con un manómetro digital, se midió y registró el flujo de aire de salida y la velocidad de la cámara. Las mediciones se interpretaron luego para proporcionar datos de diseño para la geometría óptima de la cámara que puede producir la máxima conversión de energía de las olas en energía útil.

Paulo R.F Teixeira y Djavan P. Davit [24] investigaron el dispositivo de columna de agua oscilante en tierra, en un canal de 10 m de profundidad sujeto a una onda incidente de 1 m y periodos de onda de 4 s a 15 s. Los análisis numéricos se llevaron a cabo utilizando el modelo de Fluinco que presenta problemas de flujo incompresibles basados en las ecuaciones de Navier Stokes. Se implementó un modelo aerodinámico en el algoritmo para determinar la presión de aire que se impone sobre la superficie libre. Los análisis están divididos en dos secciones. En la primera sección, se comparan las variables de flujo obtenidas por Fluinco. En la segunda sección, se lleva a cabo una investigación de la geometría de la cámara y la relación característica de la turbina que proporcionan el mejor rendimiento del dispositivo. En este caso, se realizan variaciones en la profundidad de la pared frontal, la longitud de la cámara, la relación característica de la turbina y la altura de la cámara.

Arun Kamath, Hans Bihs estudiaron la dinámica de fluidos computacionales bidimensional. Las simulaciones CFD se utilizan para investigar la respuesta de la OWC bajo diferentes valores de amortiguación desde el dispositivo. La amortiguación en la cámara se presenta utilizando una caída de presión lineal con el coeficiente de permeabilidad derivado de la ecuación de Darcy para fluir a través de medios porosos. El modelo se valida comparando los resultados numéricos a datos experimentales. La influencia de la amortiguación en la presión de la cámara, el movimiento de la superficie libre. Se estudia la velocidad del movimiento vertical de la superficie libre y la eficiencia hidrodinámica de la OWC. La eficiencia hidrodinámica se calcula como la proporción de la potencia entregada en el orificio de descarga de la OWC a la potencia de la onda incidente. Se encuentra que la amortiguación de la toma de fuerza necesario para alcanzar la máxima eficiencia hidrodinámica de la OWC aumenta con la elevación de la onda incidente. La formación de las zonas de estancamiento en el agua debido a las altas velocidades para valores más bajos de la amortiguación del dispositivo reduce la eficiencia hidrodinámica.



# Capítulo 4

## Formulación

En la Fig.(4.1), se muestra una vista de perfil de la OWC del sistema físico de estudio, se considera con un marco de referencia cartesiano, en donde el plano x-z se encuentra sobre el nivel medio del agua. El eje x es positivo hacia la derecha y el eje z es positivo hacia arriba. La estructura OWC tiene un ancho  $2H$  y una altura  $h_c$  y se encuentra parcialmente sumergida a una profundidad  $w_c$  a partir del nivel medio del mar, la pared que separa el canal con la estructura OWC tiene un espesor delgado  $s$ , el aire que incide en la cámara de compresión fluye a través de la abertura cuadrangular que tiene por lado  $2l$ ,  $h_0$  es el nivel medio del agua,  $\eta_c(t)$  es la variación de la superficie libre dentro de la columna de agua oscilante,  $s$  es el espesor de la pared sumergida,  $\eta_2(x, t)$  es la variación de la superficie libre del oleaje,  $A_I$  es la amplitud incidente de la ola,  $h_c$  es la altura de la estructura de la OWC,  $w_c$  es la parte sumergida.

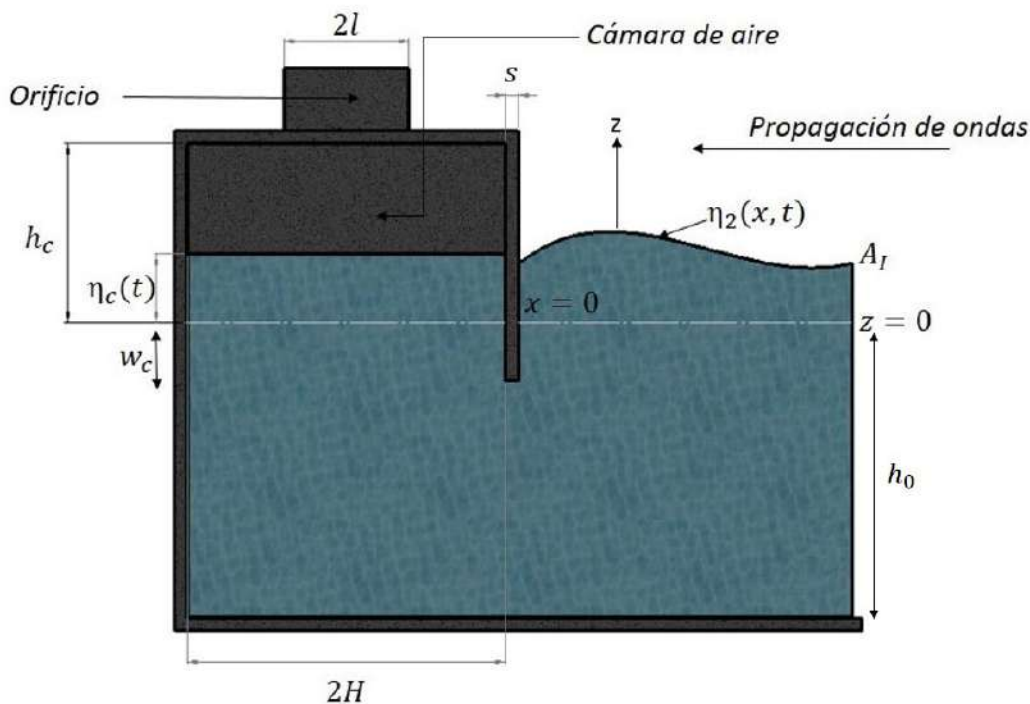


Figura 4.1: Vista de perfil del modelo físico en estudio.

### 4.1. Ecuaciones de gobierno

Para obtener la presión manométrica dentro de la cámara de aire, se usa la ley de conservación de masa y aplicamos el teorema de transporte de Reynolds a la Primera ley de la Termodinámica [25] [26].

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho_a dV + \int_{SC} \rho_a (U \cdot \hat{n}) dA \quad (4.1.1)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} e \rho_a dV + \int_{SC} e \rho_a (U \cdot \hat{n}) dA \quad (4.1.2)$$

donde  $dm/dt$  es la rapidez de emisión de masa que sale del volumen de control  $CV$ ,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $e$  es la energía específica total por unidad de masa,  $dA$  es el diferencial de área,  $U$  es el vector de velocidad del flujo diferencial de área  $dA$ ,  $\hat{n}$  es el vector unitario perpendicular a la superficie de control  $CS$ ,  $dV$  es el diferencial de volumen,  $dQ/dt$  es la rapidez de adición de calor al volumen de control desde su entorno,  $dW/dt$  es la rapidez de trabajo efectuado por el volumen de control sobre su entorno [27].

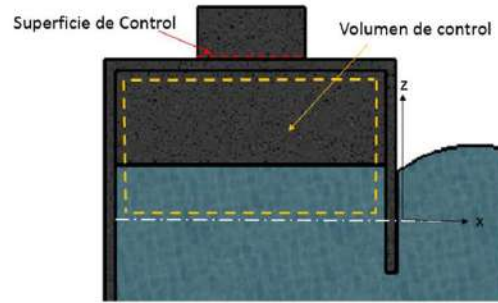


Figura 4.2: Vista del perfil del modelo de estudio. La línea punteada amarilla representa el volumen de control  $CV$  y la línea punteada roja representa la superficie de control  $CS$ .

La masa dentro del volumen de control es constante [28] por lo que :

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (4.1.3)$$

Donde un sistema se define como una cantidad arbitraria de masa de identidad fija. Todo lo externo a este sistema se denota por el término entorno, y el sistema está separado de sus alrededores por sus límites [29]. Las leyes de la mecánica establecen qué sucede cuando hay una interacción entre el sistema y su entorno. Primero, el sistema es una cantidad fija de masa, denotada por  $m$ . Por lo tanto, la masa del sistema se conserva y no cambia. Esta es una ley de la mecánica y tiene una forma matemática muy simple, por lo tanto la ecuación conservación de masa.

$$0 = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho_a dV + \int_{SC} \rho_a (U \cdot \hat{n}) dA \quad (4.1.4)$$

Nuestro término de lado izquierdo es el término de acumulación de masa dentro de la cámara de aire, y nuestro término de lado derecho es el término de entrada y salida de la masa. Desarrollando el término de entrada y salida de masa tenemos que:

$$\int_{SC} \rho_a (U \cdot \hat{n}) dA = \rho_a [(0, v) \cdot (0, 1)] (2l)^2 \quad (4.1.5)$$

donde  $vd$  es nuestra velocidad de descarga a través del orificio. Cabe mencionar que nuestro vector unitario perpendicular a la superficie de control es igual a 1 en la coordenada  $z$ . Por lo tanto Ec. (4.0.5) queda de la forma siguiente:

$$\int_{SC} \rho_a (U \cdot \hat{n}) \, dA = \rho_a vd(2l)^2 \quad (4.1.6)$$

Ahora integrando el término de acumulación de masa obtenemos:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho_a dV = \frac{d}{dt} [\rho_a (2H)^2 (h_c - \eta_c)] \quad (4.1.7)$$

En la Ec.(4.0.7) observamos que el volumen depende de  $\eta_c$  ya que es la función oscilante dentro de la OWC. Las variables que dependen del tiempo son  $\rho_a$  y  $\eta_c$ , por lo tanto al derivar con respecto al tiempo obtenemos:

$$\frac{d}{dt} [\rho_a (2H)^2 (h_c - \eta_c)] = (2H)^2 h_c \frac{d\rho_a}{dt} - (2H)^2 \eta_c \frac{d\rho_a}{dt} - \rho_a (2H)^2 \frac{d\eta_c}{dt} \quad (4.1.8)$$

Sustituyendo las Ecs. (4.0.6) y (4.0.8) en la Ec. (4.0.4) obtenemos:

$$\frac{1}{\rho_a} \left( \frac{H}{l} \right)^2 (h_c - \eta_c) \frac{d\rho_a}{dt} - \left( \frac{H}{l} \right)^2 \frac{d\eta_c}{dt} + vd = 0 \quad (4.1.9)$$

La ecuación anterior nos proporciona el balance de masa para el sistema. Debido a que la velocidad de descarga  $vd \sim O(A_I \omega)$  y para éste caso consideramos la condición de flujo incompresible, y con lo cual se garantiza que el número de Mach sea  $Ma < 0,3$  [30] y por lo tanto:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = 0 \quad (4.1.10)$$

Tomando las condiciones anteriores obtenemos la  $vd$  con condición de flujo incompresible como:

$$vd = \left( \frac{H}{l} \right)^2 \left( \frac{d\eta_c}{dt} \right) \quad (4.1.11)$$

La primera ley de la termodinámica para un sistema establece que el calor  $Q$  anádido a un sistema, menos el trabajo  $W$  hecho por el sistema, depende únicamente de los estados inicial y final del sistema. Ahora se considera como una primera aproximación que únicamente existe trabajo en la frontera y que el volumen de control es adiabático, por lo tanto  $dQ/dt = 0$  entonces nuestra Ec. (3.0.2) puede reescribirse como:

$$-\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} [e\rho_a] dV + [e\rho_a vd] dA \quad (4.1.12)$$

En la Ec. (4.0.15) observamos que tenemos un flujo de energía, y tenemos 2 términos, el término del lado izquierdo es nuestra acumulación de energía, y el término del lado derecho es la entrada y salida de energía. Sabemos que  $e$  es la energía específica  $e = u + EC + EP$  donde  $u$  es la energía interna del sistema,  $EC$  es la energía cinética y  $EP$  es la energía potencial. Además  $vd(2l)^2$  es un flujo volumétrico y por lo tanto  $q(t) = vd(t)(2l)^2$ . Nuestro diferencial de

volumen lo tomamos como  $dV = (2H)^2 dz$ , donde sabemos que nuestro  $dz$  esta definido como  $h_c - \eta_c$ . Para obtener la rapidez del trabajo efectuado por el volumen de control sobre su entorno, se considera que:

$$-\frac{dW}{dt} = -P(t)q(t) \quad (4.1.13)$$

Tomando en cuenta que nuestro diferencial de trabajo es igual a la presión por un flujo volumétrico obtenemos:

$$-P(t)q(t) = \frac{d}{dt} \int_{VC} \left[ \hat{u} + \frac{1}{2} \left( \frac{d\eta_c}{dt} \right)^2 + gz \right] \rho_a dV + \left( \hat{u} + \frac{1}{2} v d^2 + gh_c \right) \rho_a q(t) \quad (4.1.14)$$

Integrando el término de rapidez de acumulación de energía del volumen de control obtenemos la expresión siguiente:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \left( \hat{u} + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \rho_a dV = 4H^2 \frac{1}{\rho_a} \frac{d}{dt} \left[ \hat{u} (h_c - \eta_c) + \frac{1}{2} \left( \frac{d\eta_c}{dt} \right)^2 (h_c - \eta_c) + \frac{1}{2} g (h_c^2 - 2h_c \eta_c + \eta_c^2) \right] \quad (4.1.15)$$

Consideramos que la energía cinética por unidad de masa en la superficie de control es mucho mas grande que la energía potencial por unidad de masa. Lo anterior implica que  $\rho_a g h_c \ll v d^2$  y por lo tanto la ecuación se reescribe como:

$$-P(t) = \rho_a (h_c - \eta_c) \left( \frac{d^2 \eta_c}{dt^2} \right) + \frac{\rho_a}{2} \left[ \left( \frac{H}{l} \right)^4 - 1 \right] \left( \frac{d\eta_c}{dt} \right)^2 - \rho_a g \eta_c \quad (4.1.16)$$

Debemos tomar en cuenta que el valor absoluto de las variables  $P(t)$  y  $q(t)$  es debido a que cuando la columna de agua oscilante se mueve hacia arriba o hacia abajo siempre se produce una potencia útil en la cámara de aire. Por lo tanto la potencia útil instantanea que se puede extraer de la cámara de aire de la OWC se define como:

$$P_{OWC}(t) = |P(t)q(t)| \quad (4.1.17)$$

Por otro lado la eficiencia de la OWC se expresa como:

$$\sigma = \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t)q(t) dt}{\frac{1}{2} \rho g c \eta_2^2} \quad (4.1.18)$$

## 4.2. Análisis adimensional

Tomando en cuenta el análisis anterior se proponen las variables adimensionales que componen nuestro sistema y son las siguientes:

$$\bar{P} = \frac{P}{Pa} \quad \Delta_c = \frac{\eta_C}{A_I} \quad \tau = \frac{t}{t_c} \quad \bar{V}_d = \left( \frac{\omega_c + L_v}{g} \right)^{1/2} \frac{v_d}{A_I} \quad (4.2.1)$$

Adimensionalizando y ordenando la Ecuación 4.1.16, obtenemos la expresión para la obtención de nuestra presión adimensional:

$$\bar{P}(\tau) = \beta\bar{\gamma}_c \left[ (\Delta_c - \phi) \frac{d^2\Delta_c}{d\tau^2} + \frac{1}{2}(1 - \theta^4) \left( \frac{d\Delta_c}{d\tau} \right)^2 \right] + \bar{\gamma}_c \Delta_c \quad (4.2.2)$$

Con los parámetros adimensionales:

$$\phi = \frac{h_c}{A_I} \quad \bar{\gamma}_c = \frac{\rho_a g A_I}{\rho_a} \quad (4.2.3)$$

Para obtener nuestra velocidad de descarga adimensional la obtenemos de la ecuación 4.1.11 y obtenemos:

$$\bar{V}_d = \theta^2 \left( \frac{d\Delta_c}{d\tau} \right) \quad (4.2.4)$$

Para realizar el estudio paramétrico en el software COMSOL Multiphysics, se variaron tres parámetros esenciales para realizar la optimización de la cámara de aire:  $\Gamma$ ,  $\mu$  y  $\theta$ . Donde:

$$\Gamma = \frac{2H}{b2} \quad \mu = \frac{w_c}{h_0} \quad \theta = \frac{2H}{2l} \quad (4.2.5)$$

$\Gamma$  es la propagación del oleaje, donde  $2H$  es el ancho de entrada de la onda a la OWC,  $b2$  es el ancho de la onda propagada antes de entrar a la OWC.

$\mu$  es un parámetro que relaciona la altura de la pared sumergida  $w_c$  de la OWC con respecto a la altura media del agua  $h_0$ .

$\theta$  es un parámetro adimensional que relaciona el ancho del orificio de descarga  $2l$  con respecto al ancho de la OWC  $2H$ .

### 4.3. Condiciones de frontera

Para la solución en CFD, se plantearon las condiciones iniciales y de frontera descritas por [31]

Para el dominio del agua en la entrada y dentro de la OWC se definen de la manera siguiente:

$$t = 0s, \quad \nabla u1 = 0m/s, \quad P1 = 0Pa$$

Para el dominio dentro de la cámara se definen como:

$$t = 0s, \quad \nabla u2 = 0m/s, \quad P2 = 0Pa$$

Para la condición a la entrada de la OWC:

$$x = 2H \quad ux = \frac{d\eta_w}{dt} = \frac{A_i \omega}{\sqrt{\Gamma * (1 - \mu)}} \sin(\omega t)$$

Para las condiciones de frontera implementadas en COMSOL, se observan en la Fig. (4.3).

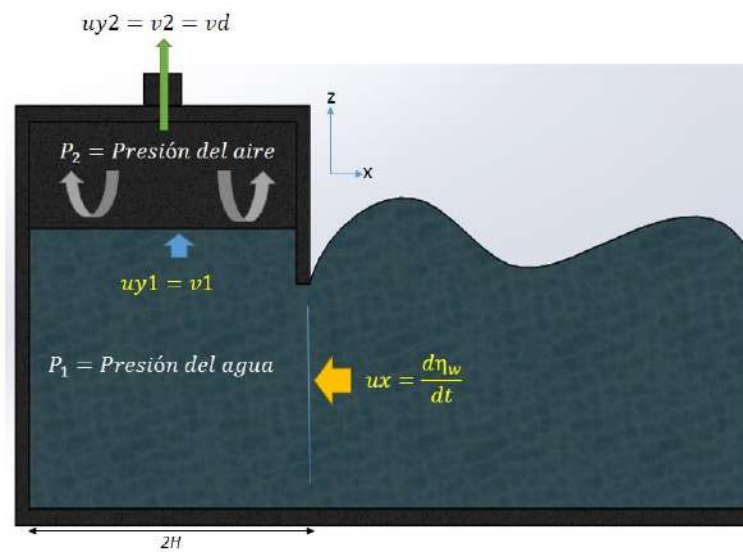


Figura 4.3: Condiciones de frontera

# Capítulo 5

## Resultados

Los resultados numéricos se realizaron tomando en cuenta los valores físicos experimentales de  $2H=1\text{m}$  y longitudes diferentes del orificio de la cámara de aire  $2l= 0.2\text{m}, 0.1\text{m}, 0.05\text{m}, 0.04\text{m}$ . También se realizó una variación para la pared sumergida con  $w_c= 0.14\text{m}, 0.25\text{m}, 0.50\text{m}$ . Para el cálculo numérico, se utiliza una discretización numérica por el método de elementos finitos, considerando un mallado triangular uniformemente distribuida en el área del dominio, ver Fig. (5.1), con tamaño de elemento máximo de  $0.0871\text{ m}$ , un tamaño de elemento mínimo de  $3.9 \text{ exp-4}$  y un rango de crecimiento del elemento 1.1.

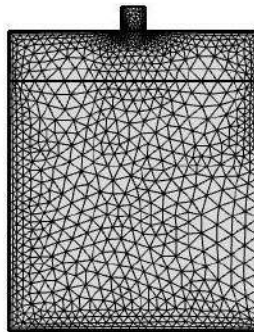


Figura 5.1: Mallado del sistema físico en estudio.

La Fig.(5.2), Fig.(5.3), Fig.(5.4) muestran los diagramas de flujo para el desarrollo del cálculo numérico del sistema para diferentes valores de los parámetros adimensionales  $\theta, \Gamma, \mu$  [32]. Para la modelación de la Dinámica de fluidos Computacional se utilizan dos módulos del Software COMSOL Multiphysics 5.3a, una para resolver la hidrodinámica dentro de la OWC (Módulo de: Flujo laminar monofásico) y otra para la aerodinámica dentro de la cámara de aire (Módulo de: Flujo laminar monofásico), una vez seleccionada la física del sistema se procede a generar la geometría; este procedimiento nos permite localizar las fronteras físicas y también nos permite seleccionar los dominios de la parte sólida (estructura), los dominios de la parte líquida (agua) y dominios del flujo de aire. Por otro lado se introducen las propiedades de los fluidos. Posterior a estas etapas se introducen las condiciones de frontera, se genera la malla y se resuelven las ecuaciones de gobierno dependientes en el tiempo.

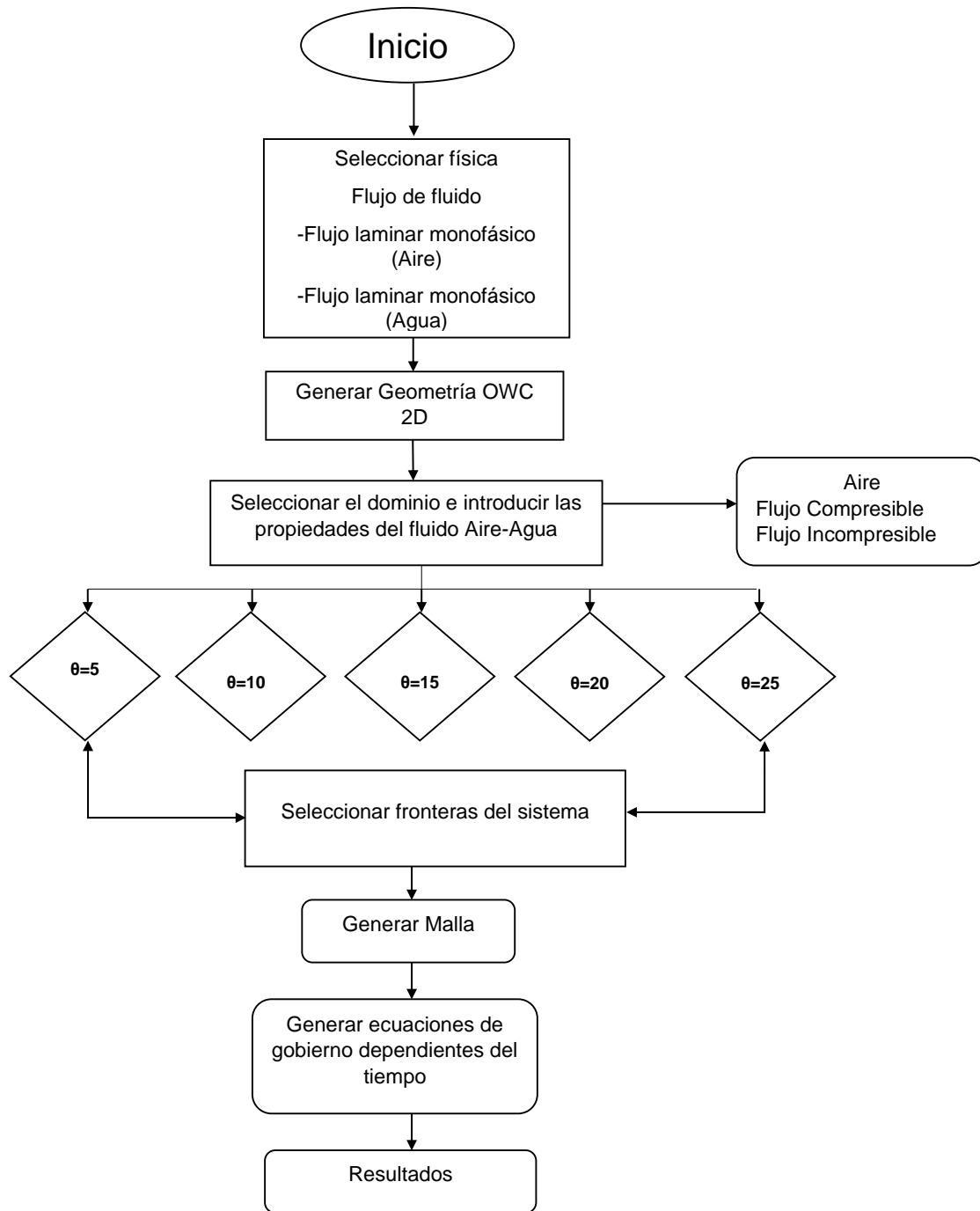


Figura 5.2: Diagrama de flujo del análisis de Dinámica de Fluidos Computacionales, aplicando variaciones en la longitud del orificio de salida del aire con respecto al ancho de la estructura de la OWC.



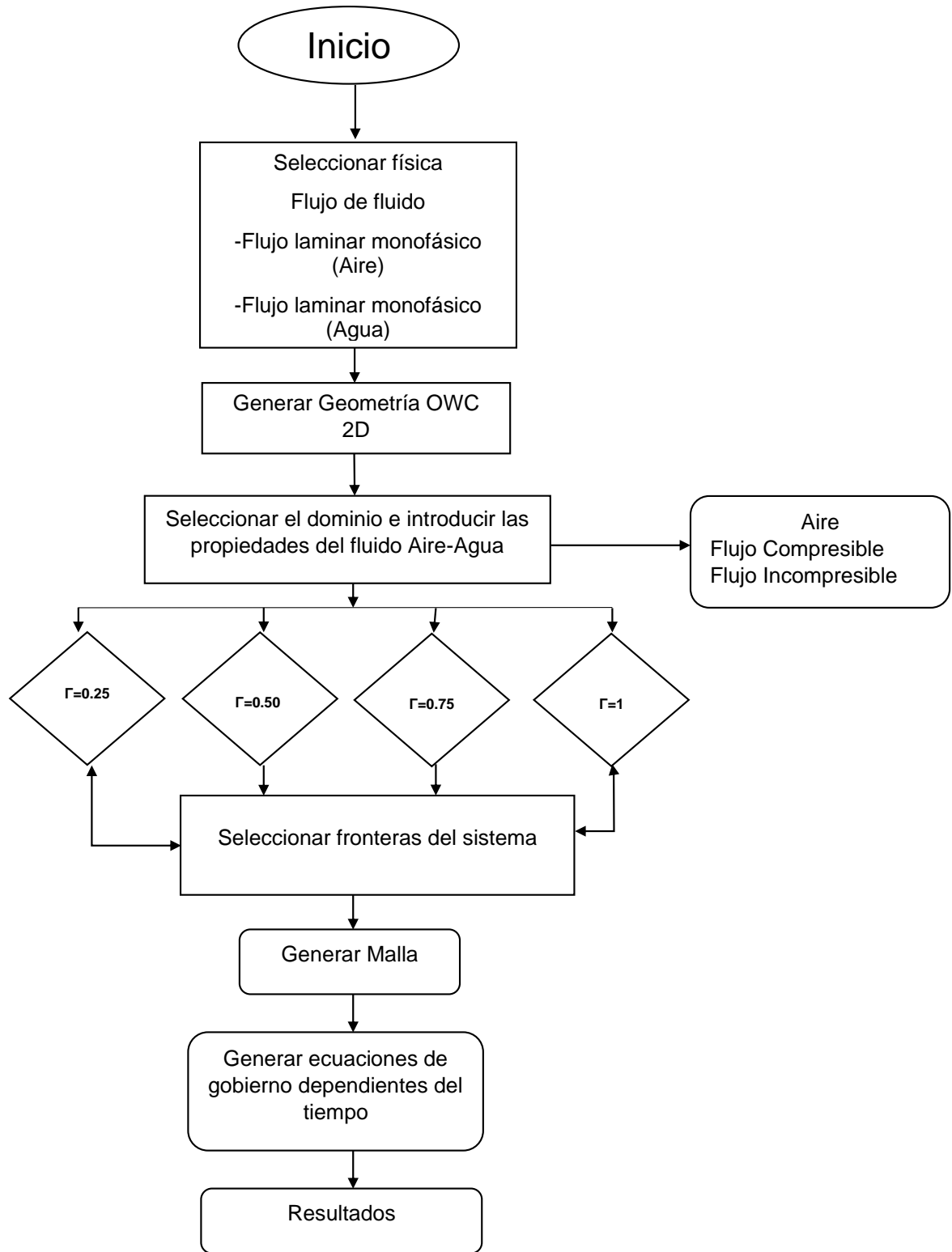


Figura 5.3: Diagrama de flujo del análisis de Dinámica de Fluidos Computacional aplicando variaciones en el parámetro adimensional  $\Gamma$ .

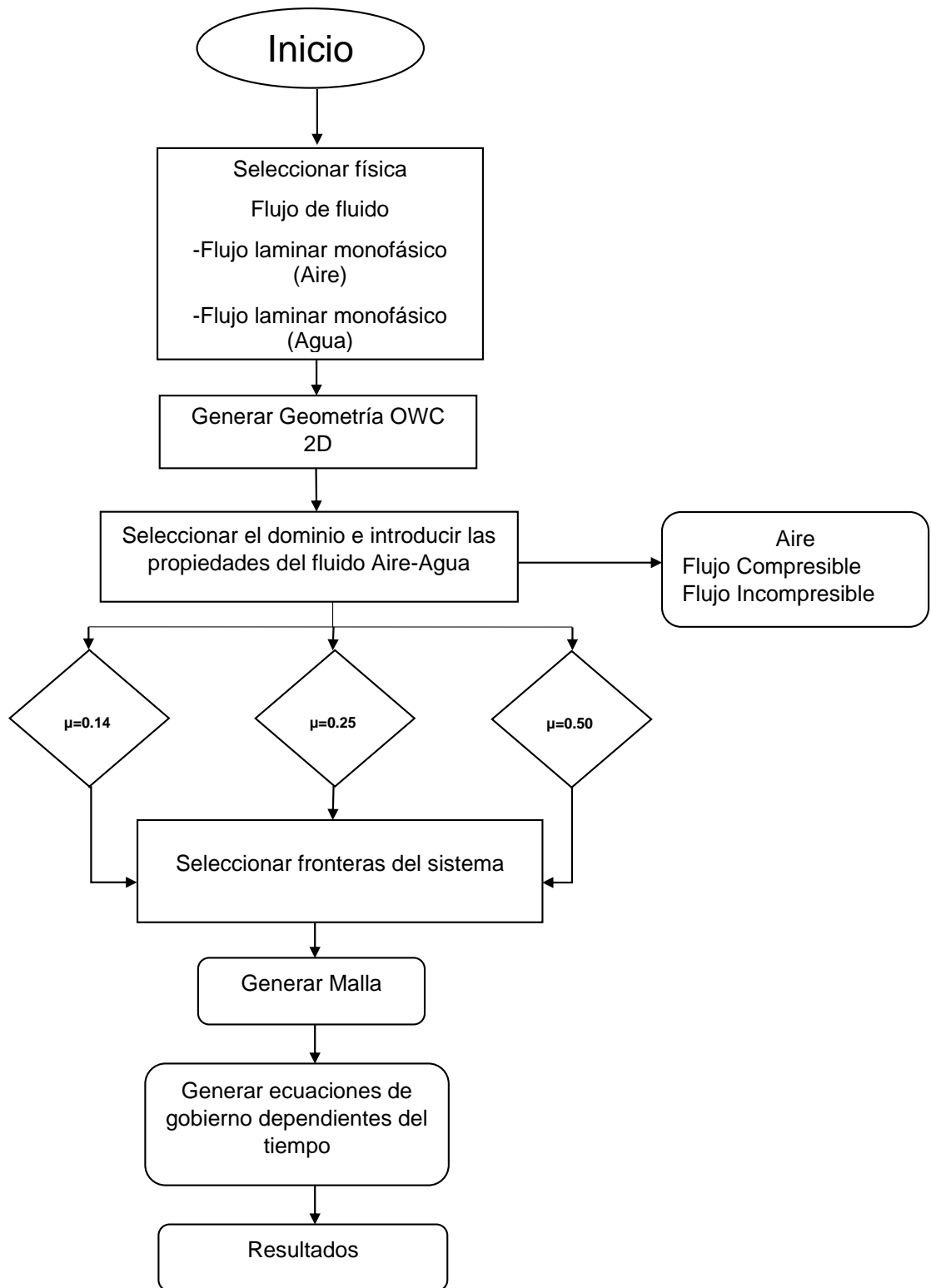


Figura 5.4: Diagrama de flujo del análisis de Dinámica de Fluidos Computacional aplicando variaciones en el parámetro adimensional  $\mu$ .

La Fig.(5.5) muestra la cámara de aire en dos dimensiones en el Software Comsol 5.3a, se observa el campo vectorial de velocidades del aire producido por la hidrodinámica del agua en la cual tenemos un  $2H = 1\text{m}$ ,  $2l = 0.1\text{m}$ . En las figuras se observa el ciclo de la velocidad de descarga del aire. En el tiempo  $t=4\text{s}$  se observa la etapa de aspiración del aire a través del orificio producido por la disminución del nivel del agua dentro de la OWC, en el tiempo de  $t=7\text{s}$  se observa el comportamiento del aire después de la aspiración, en el tiempo  $t=36\text{s}$  se observa la compresión del aire producido por la elevación del agua para llegar al  $t=41\text{s}$  con la expulsión del aire a través del orificio. Con los parámetros y condiciones planteados en este análisis tenemos una velocidad de descarga promedio de  $vd = 2\text{ m/s}$

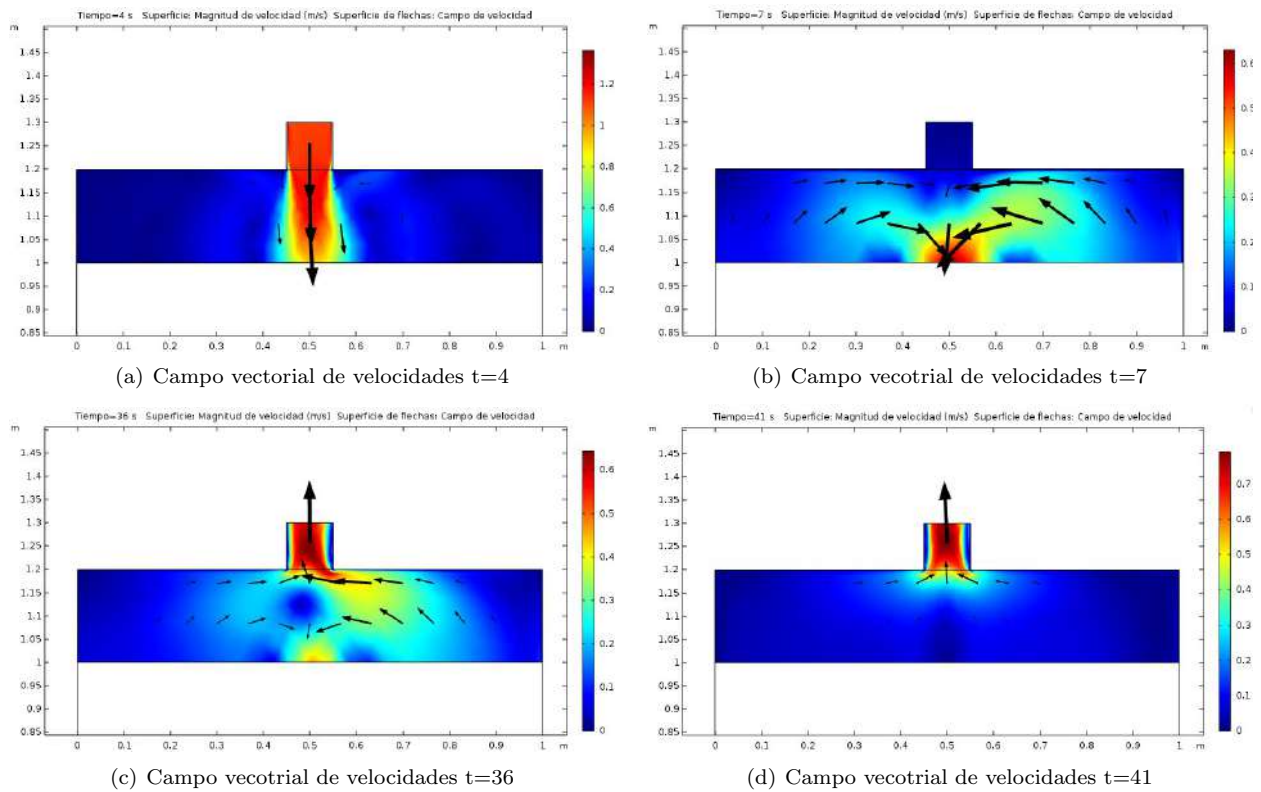


Figura 5.5: Campo vectorial de la velocidad del aire dentro de la cámara en diferentes tiempos con parámetros de  $\theta = 10$ ,  $\mu=0.3$ ,  $\Gamma = 1$  para  $t=(4, 7, 36, 41)\text{s}$ .

En la Fig.(5.6) se muestran las isóbaras dentro de la cámara de aire de la OWC manteniendo fijos los parámetros de  $\theta = 10$ ,  $\mu=0.3$ ,  $\Gamma = 1$ . En ella se observa el campo de presiones generada por la oscilación del agua dentro de la OWC [33]. Al generarse una compresión dentro de la OWC el aire fluye por el orificio de salida a una presión aproximada de  $5\text{ Pa}$  para los parámetros establecidos en este análisis.

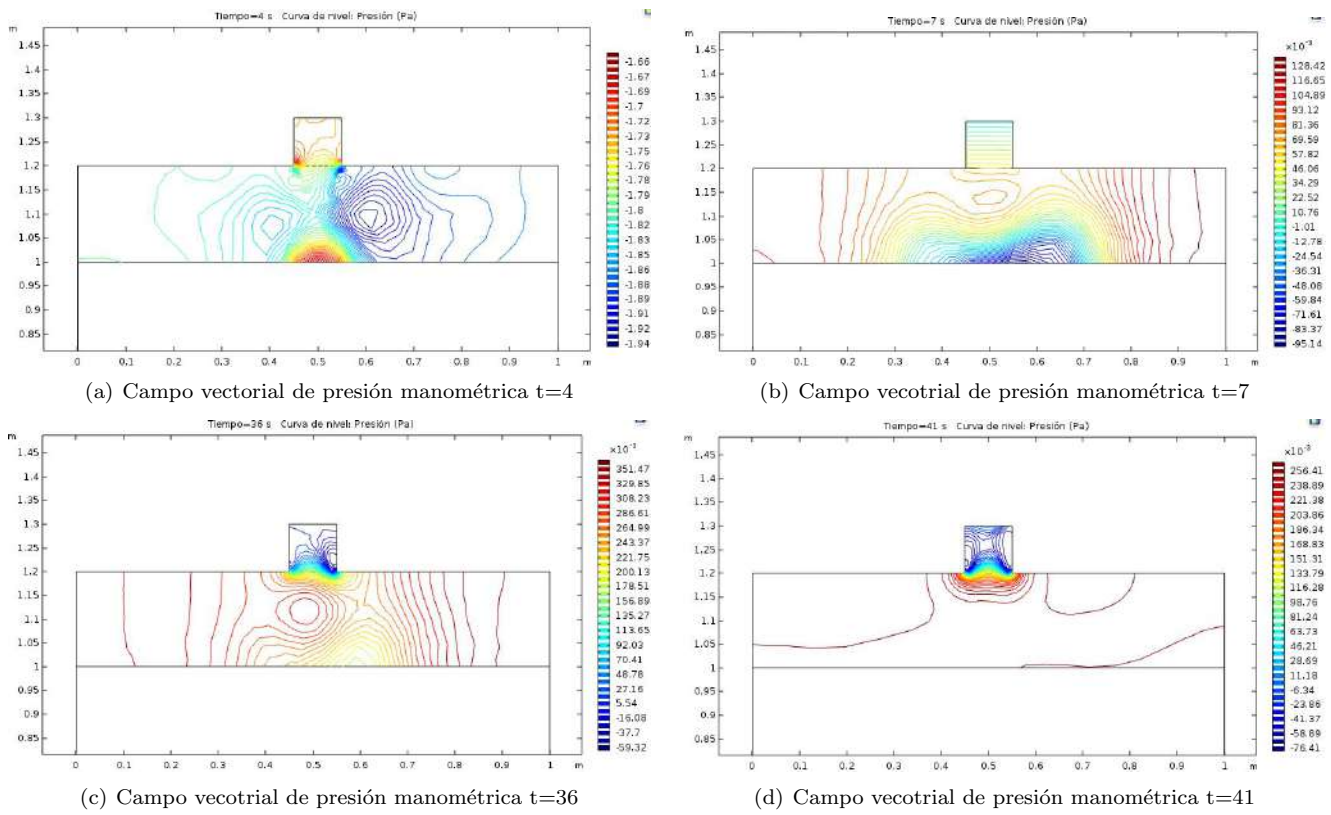


Figura 5.6: Campo vectorial de la presión manométrica dentro de la cámara en diferentes tiempos con parámetros de  $\theta = 10$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $\Gamma = 1$ . con  $t(= 4, 7, 36, 41)$  s

En la Fig.(5.7) muestra la OWC, y se observa el campo de velocidades del agua dentro de la OWC. Se observa que la velocidad mayor es el contorno rojo con una velocidad aproximada de 0.07 m/s en el tiempo de 24 segundos. Los parámetros que se aplicaron en la simulación de  $\theta = 20$ ,  $\Gamma = 1$ ,  $\mu = 0,3$ .

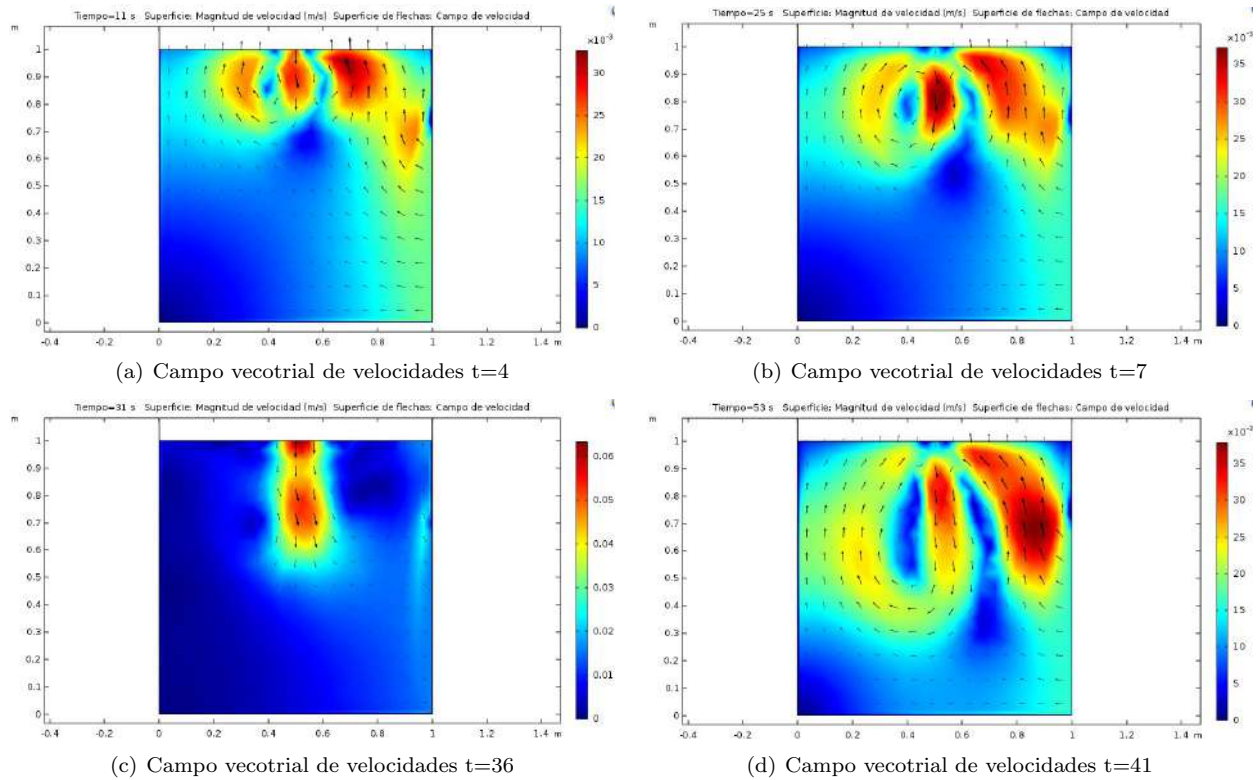


Figura 5.7: Campo vectorial de la velocidad del agua dentro de la OWC con parámetros de  $\theta = 10$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $\Gamma = 1$  y  $t=(4, 7, 36, 41)$ s.

## 5.1. Efectos del orificio de descarga de la cámara de aire.

Uno de los principales parámetros a variar fue el ancho  $2l$  del orificio de descarga del aire de la cámara, en este análisis se propuso un orificio cuadrado del cual obtenemos un parámetro adimensional que relaciona el ancho del orificio de descarga del aire  $2l$  con el ancho de la estructura de la OWC  $2H$  del cual obtenemos  $\theta$  [34]. En la Fig.(5.8) observamos la velocidad de descarga con respecto al tiempo. Para este análisis dejamos fijos los parámetros de  $\mu=0.3$ ,  $\Gamma = 1$ , y variamos  $\theta$ . Observamos que la velocidad de descarga aumenta conforme aumentemos  $\theta$ . Planteando  $\theta=(5, 10, 20, 25)$ , observamos que la velocidad de descarga aumenta con respecto al aumento de  $\theta$ , la velocidad máxima que se genera es una  $vd = 7m/s$  aproximadamente con un  $\theta = 25$ . En la Fig.(5.9) observamos la presión manométrica de la cámara de aire con respecto al tiempo, realizamos la misma variación de  $\theta$  y observamos el aumento de la presión con respecto el aumento de  $\theta$ , tenemos una  $P = 2Pa$  aproximadamente con un  $\theta = 5$ , y una  $P = 60Pa$  para  $\theta = 25$ , para la variación del parámetro  $\theta$  observamos que el comportamiento de la velocidad y la presión manométrica son similares con respecto el aumento de  $\theta$ .

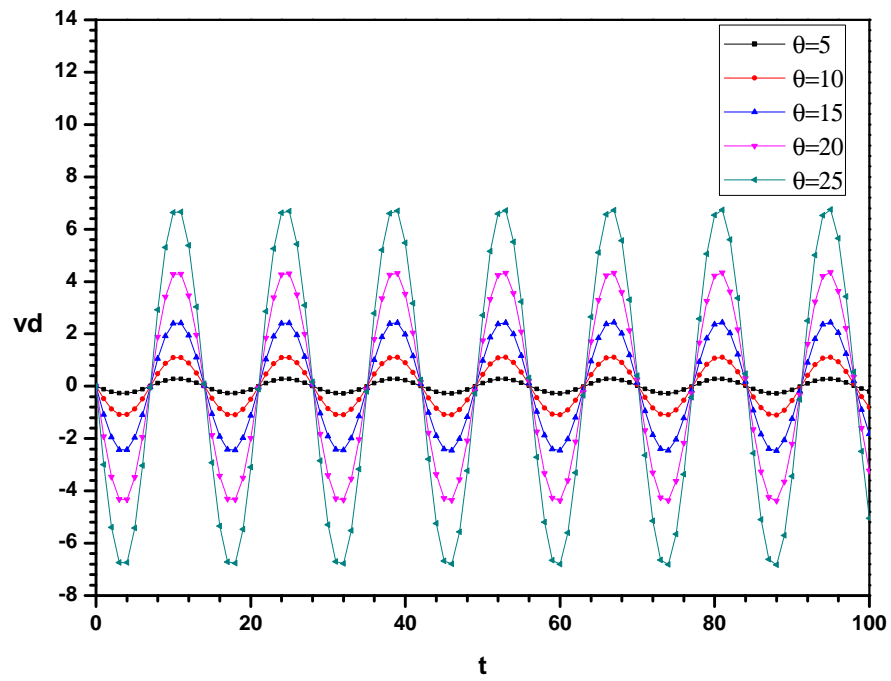


Figura 5.8: Variación de la velocidad de descarga (m/s) en función del tiempo (s), con  $\Gamma=1$ ,  $\mu=0.3$ ,  $A_i=0.03\text{m}$ ,  $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes aperturas del orificio  $\theta$ (= 5, 10, 15, 20 y 25).

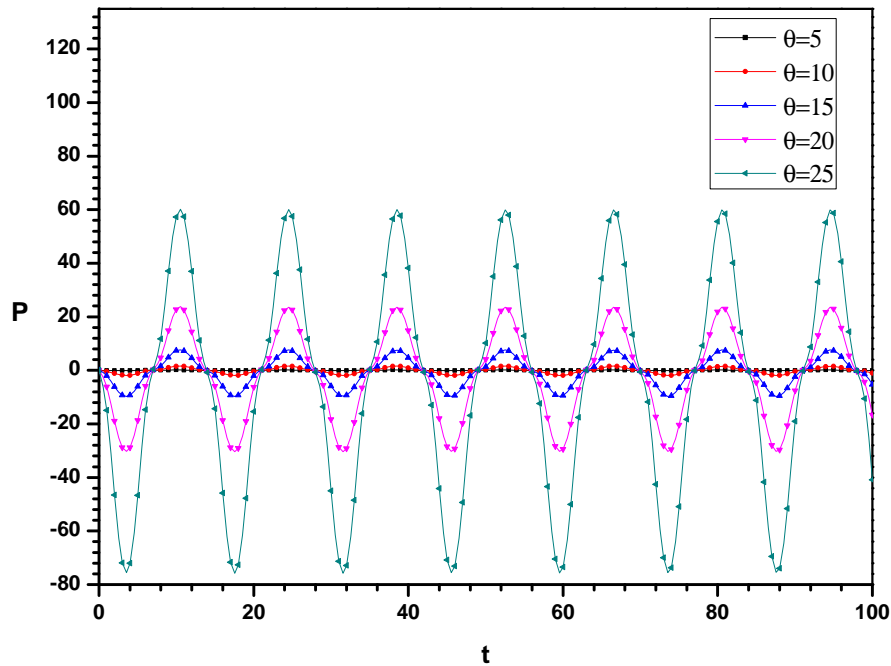


Figura 5.9: Variación de la presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s), con  $\Gamma=1$ ,  $\mu=0.3$ ,  $Ai=0.03\text{m}$ ,  $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes aperturas del orificio ( $\theta=5, 10, 15, 20$  y  $25$ ).

## 5.2. Efectos de la pared vertical sumergida.

En este análisis nos basamos en la variación de la pared sumergida, se obtuvo un parámetro adimensional  $\mu$  que relaciona la altura de la pared sumergida  $w_c$  con la altura promedio del agua  $b_0$ . En la Fig.(5.10) se observa la velocidad de descarga, pero variando el parámetro  $\mu$ . Para este análisis fijamos los parámetros de  $\theta=20$  y  $\Gamma=1$ , Por lo tanto la altura de la pared sumergida variados fue de  $w_c=(0.14\text{m}, 0.25\text{m}, 0.50\text{m})$ . Para la variación de este parámetro, observamos la Fig.(5.10) la cuál muestra la velocidad de descarga observamos que la diferencia de velocidades es aproximadamente de  $1.2\text{ m/s}$ , para un  $\mu=0.14$  y  $\mu=0.25$  observamos que la diferencia de velocidad de descarga es aproximadamente de  $0.5\text{ m/s}$ .

En la Fig.(5.11) se observa la presión manométrica dentro de la cámara de aire con respecto al tiempo, observamos una serie de oscilaciones de presión y al igual que la velocidad de descarga no hay una gran variación, para  $\mu=0.14$  y  $\mu=0.25$  hay una diferencia de presión de  $5\text{ Pa}$  aproximadamente. Al observar la oscilación de presiones tenemos una presión positiva máxima de  $30\text{ Pa}$  aproximadamente y una presión negativa de  $38\text{ Pa}$  aproximadamente, recordando que se debe tomar el modulo de la presiones ya que siempre se esta generando una presión a pesar de la dirección del flujo de aire.

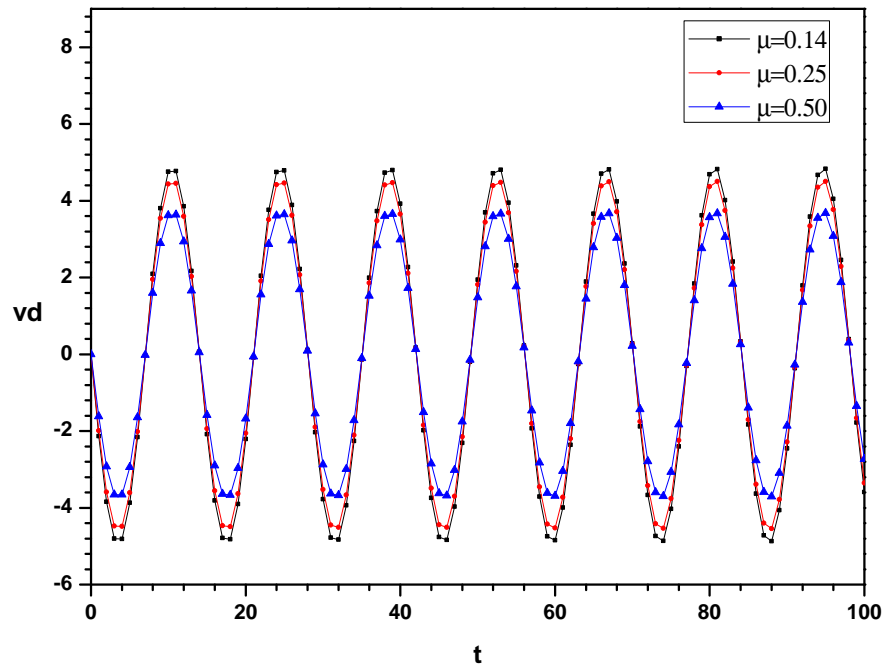


Figura 5.10: Variación de la velocidad de descarga (m/s) en función del tiempo (s), con  $\Gamma=1$ ,  $\theta=20$ ,  $A_i=0.03\text{m}$ ,  $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes alturas de la pared sumergida en relación a la altura media del agua  $\mu$  (= 0.14, 0.25 y 0.50).



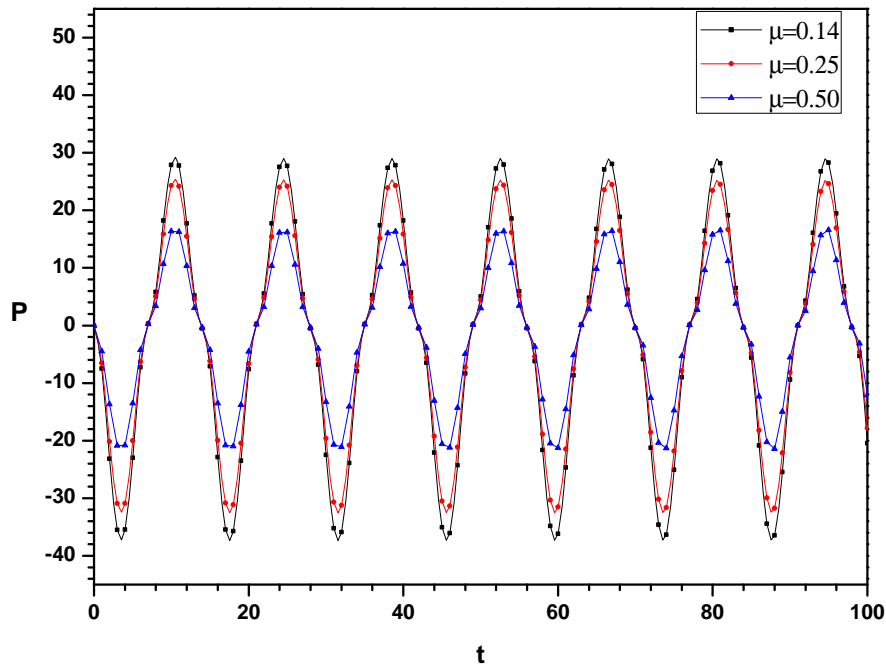


Figura 5.11: Variación de la presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s), con  $\Gamma=1$ ,  $\theta=20$ ,  $Ai=0.03\text{m}$ ,  $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes alturas de la pared sumergida en relación a la altura media del agua ( $\mu(= 0.14, 0.25$  y  $0.50)$ ).

### 5.3. Efectos del parámetro de propagación de la onda a la OWC.

Para este análisis tomamos en cuenta la variación del parámetro de  $\Gamma$ . Este parámetro describe la propagación del oleaje a la entrada de la OWC. Es una relación del ancho de la onda propagada con respecto al ancho de la entrada de la estructura de la OWC. Si  $\Gamma=1$  significa que la onda propagada es del mismo ancho que la la entrada de la estructura de la OWC. Si  $\Gamma < 1$ , significa que el ancho de la onda es mayor que el ancho de la entrada de la OWC. En la Fig.(5.12) se muestra la velocidad de descarga  $vd$  en función del tiempo. Fijando el valor de la amplitud incidente  $Ai= 0.03\text{m}$ , y los parámetros  $\mu=0.3$ ,  $\theta=20$ ,  $\omega=0.448$  realizamos una comparación de  $\Gamma(=0.25, 0.50, 0.75$  y  $1)$  y observamos que si el ancho de la onda propagada es mayor que el ancho de la entrada de la estructura la velocidad de descarga será mayor, para un  $\Gamma= 0.25$  obtenemos una  $vd=8.5$  m/s aproximadamente, esto debido a una entrada de flujo volumétrico del agua mayor. Si el ancho de la onda propagada es igual al ancho de la estructura de la OWC  $\Gamma= 1$  obtenemos una  $vd=4\text{m/s}$  aproximadamente.

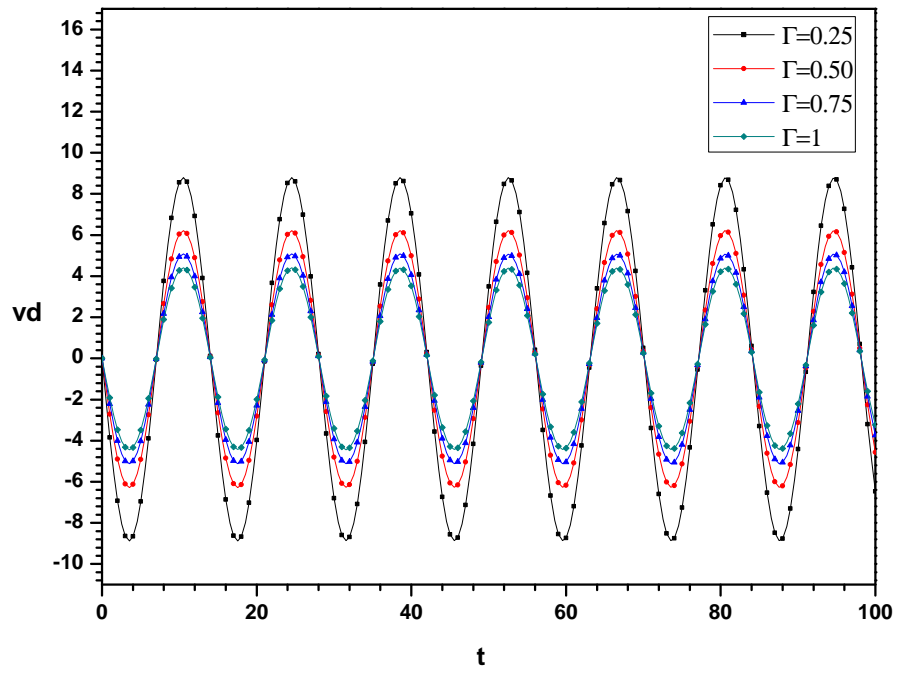


Figura 5.12: Variación de la velocidad de descarga (m/s) en función del tiempo (s), con  $\mu=0.3$ ,  $\theta=20$ ,  $A_i=0.03m$ ,  $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes parámetros de propagación de la onda  $\Gamma(= 0.25, 0.50, 0.75$  y  $1)$ .

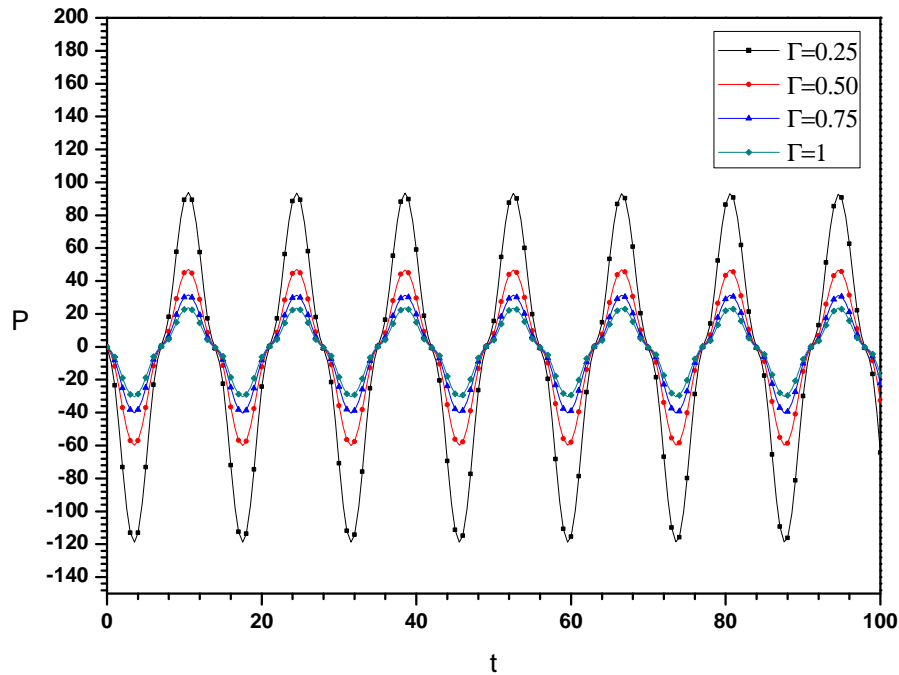


Figura 5.13: Variación de la presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s), con  $\mu=0.3$ ,  $\theta=20$ ,  $Ai=0.03m$ ,  $\omega=0.448$ , como constantes para diferentes parámetros de propagación de la onda  $\Gamma$  ( $= 0.25, 0.50, 0.75$  y  $1$ ).

#### 5.4. Efectos de $\theta$ aplicando como flujo compresible o incompresible.

En nuestro análisis teníamos que considerar si había algún cambio en considerar al aire como un flujo compresible o incompresible. Un parámetro de suma importancia que se debe tomar en cuenta es el parámetro de  $\theta$  ya que de este depende la abertura del orificio con respecto al ancho de la estructura de la OWC. Si el ancho del orificio es demasiado pequeño en relación a la estructura, el aire acumulado en la cámara tendrá una mayor dificultad para salir, esto considerando hasta un cierto rango [35]. En la Fig(5.14.a) se observa la gráfica de presión con respecto al tiempo, con un  $\theta=50$  esto tomando en cuenta a  $2H=1m$  y  $2l=0.02m$ , en ella observamos el análisis aplicando al fluido como flujo compresible e incompresible, y observamos una diferencia de presión aproximadamente de 25 Pa, esto quiere decir que a partir de este parámetro comienza a dar un afectación el ancho del orificio. En la Fig.(5.14.b) tenemos un parámetro de  $\theta=80$ , con este parámetro tenemos una mayor diferencia de presión, aproximadamente de 1700 Pa para este parámetro. En la Fig.(5.14.c) tenemos un  $\theta=100$  y observamos una mayor diferencia de presión aproximadamente de 20 KPa, aquí observamos que al tomar al fluido como flujo compresible la presión es mucho mayor.

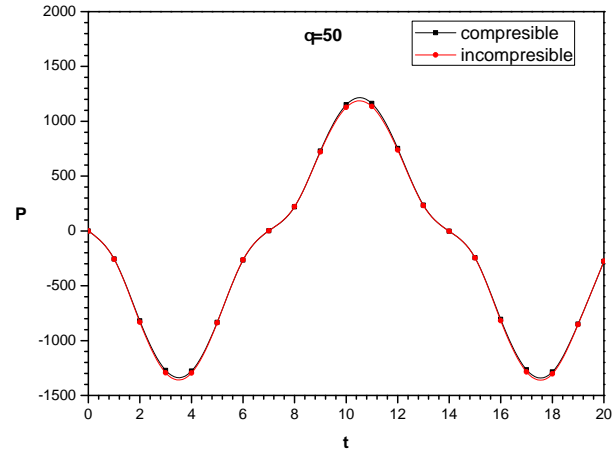
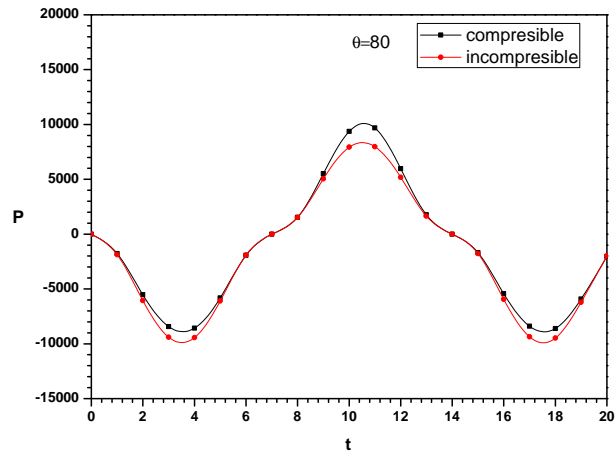
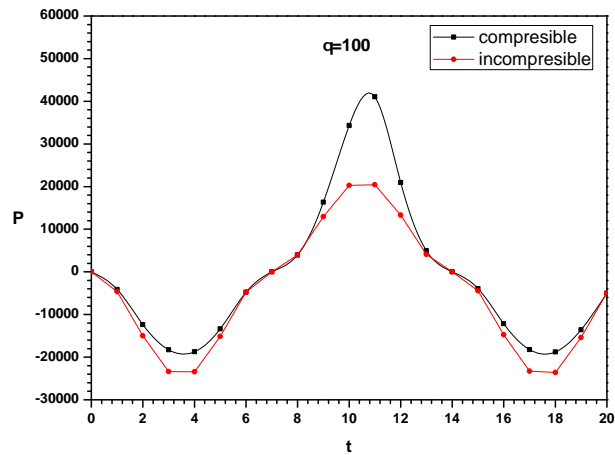
(a)  $\theta=50$ (b)  $\theta=80$ (c)  $\theta=100$ 

Figura 5.14: Presión manométrica (Pa) dentro de la cámara de aire en función del tiempo (s) variando flujo compresible e incompresible para  $\theta=(50, 80$  y  $100)$ .

## 5.5. Incremento de la potencia de la cámara de aire de la OWC, variando los parámetros $\theta$ , $\mu$ y $\Gamma$ .

Para la obtención de la potencia de la OWC  $P_{OWC}$ , se obtiene de la siguiente ecuación:

$$P_{OWC} = |P * q| \quad (5.5.1)$$

Donde  $P$  es nuestra presión manométrica obtenida dentro de la cámara de aire de la OWC, para el flujo volumétrico  $q$  la obtenemos de  $q = v_d * A_{orificio}$  y  $v_d$  es nuestra velocidad de descarga del aire a través del orificio así como el area del orificio de salida  $A_{orificio}$ . La Fig.(5.15) muestra la comparación de potencias de la OWC variando el parámetro  $\theta$ (=5, 10, 15, 20 y 25) en función del tiempo manteniendo fijos los parámetros de  $\Gamma=1$ ,  $\omega=0.443$ ,  $\mu=0.3$  y el valor de la amplitud incidente de la onda de  $A_i= 0.03\text{m}$ , se observa que en  $\theta=5$  la potencia es de 0.0015 W aproximadamente, y con  $\theta=25$  tenemos una potencia aproximadamente de 0.9 W. En la Fig.(5.16) se observa la comparación de potencias de la OWC en función del tiempo variando el parámetro de  $\mu$ (=0.14, 0.25 y 0.50) dejando fijos los parámetros de  $\Gamma=1$ ,  $\omega=0.443$ ,  $\theta=20$  y el valor de la amplitud incidente de la onda de  $A_i= 0.03\text{m}$ , y observamos que la pared sumergida tiene una influencia comparando a  $\mu=0.14$  que genera con los valores ya mencionados una potencia aproximada de 0.46 W mientras que al aumentar el parámetro de  $\mu$  nuestra potencia comienza a disminuir hasta llegar a un  $\mu=0.50$  generando una potencia de 0.2 W aproximadamente [36]. El parámetro de la propagación de la onda  $\Gamma$  es de gran influencia como se observa el la Fig.(5.17) que muestra la gráfica comparando las potencias de la OWC en función del tiempo variando los parámetros de propagación de la onda  $\Gamma$ (=0.25, 0.50, 0.75 y 1) y fijando el valor de la amplitud incidente de la onda  $A_i=0.03\text{m}$  así como los parámetros de  $\theta=20$ ,  $\mu=0.3$ ,  $\omega=0.443$ . En la gráfica se observa que la potencia es mínima cuando  $\Gamma=1$  con una potencia de 0.48 W aproximadamente. Cuando  $\Gamma=0.25$  la potencia máxima se eleva a 3.5 W aproximadamente

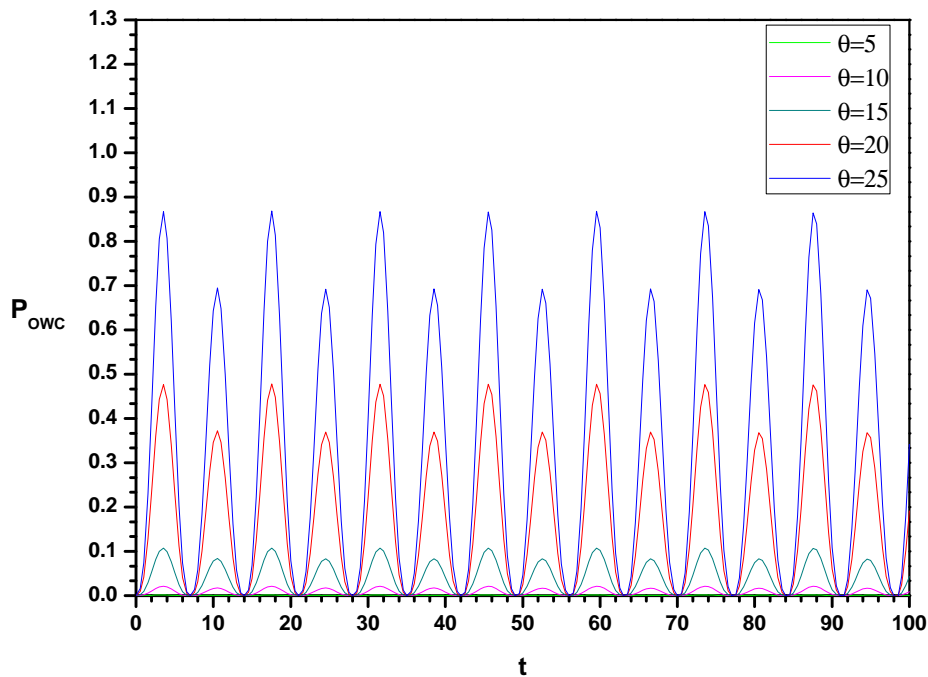


Figura 5.15: Potencia total de la OWC en función del tiempo con  $\mu=0.3$ ,  $A_i=0.03$ ,  $\omega=0.448$ ,  $\Gamma=1$ , como constantes para diferentes parámetros de apertura del orificio de salida del aire  $\theta$ (=5, 10, 15, 20 y 25).

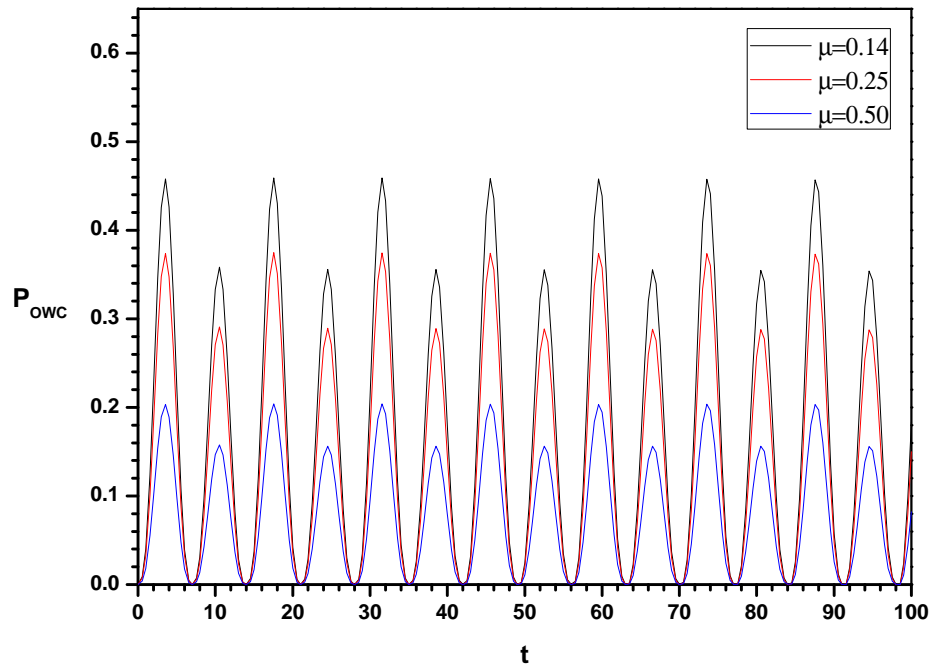


Figura 5.16: Potencia total de la OWC en función del tiempo con  $\theta=20$ ,  $Ai=0.03$ ,  $\omega=0.448$ ,  $\Gamma=1$ , como constantes para diferentes parámetros de altura de la pared sumergida en relación con la altura media del agua  $\mu$  ( $=0.14$ ,  $0.25$  y  $0.50$ ).

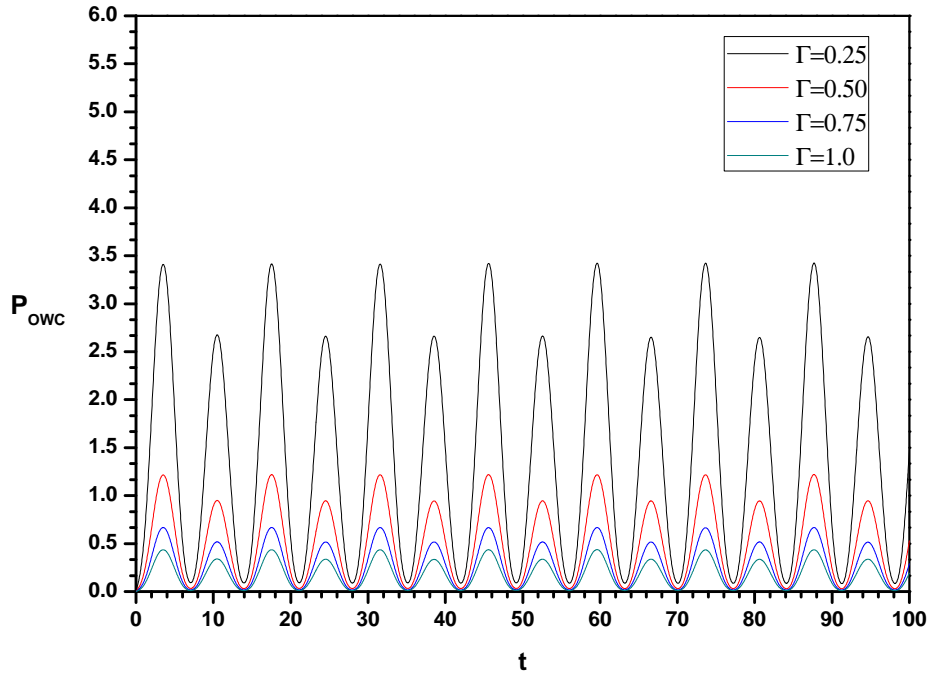


Figura 5.17: Potencia total de la OWC en función del tiempo con  $\theta=20$ ,  $Ai=0.03$ ,  $\omega=0.448$ ,  $\mu=0.3$ , como constantes para diferentes parámetros de propagación de la onda ( $\Gamma=0.25, 0.50, 0.75$  y  $1$ ).

## 5.6. Eficiencia capturada de la OWC

Tomando en cuenta los valores de la potencia máxima de la OWC obtenemos un valor promedio:

$$P_{OWC}^- = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |P(t) * q(t)| dt \quad (5.6.1)$$

Para la potencia de la onda generada antes de la entrada de la OWC:

$$P_{onda}^- = \frac{1}{2} \rho g C \eta_w^2 \quad (5.6.2)$$

Donde  $\eta_w^2 = \frac{Ai}{\sqrt{\Gamma^*(1-\mu)}}$  y dicha variable va a depender del parámetro de propagación  $\Gamma$  y de  $\mu$ . Por lo tanto para obtener la eficiencia capturada de la OWC:

$$\sigma = \frac{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t)q(t)dt}{\frac{1}{2} \rho g C \eta_w^2} \quad (5.6.3)$$

En la Fig.(5.18) muestra la eficiencia capturada de la OWC en función del parámetro de propagación de la onda  $\Gamma$  variando la apertura del orificio de descarga del aire ( $\theta=5, 10, 15, 20$  y  $25$ ) y fijando el valor de la amplitud

incidente  $A_i = 0.03\text{m}$  así como los parámetros de  $\mu=0.3$  y  $\omega=0.448$ . Observamos que  $\theta=5$  tiene la menor eficiencia aproximadamente de 0.0016; para  $\theta=25$  observamos con un valor de propagación de la onda  $\Gamma=0.1$  tenemos una eficiencia de 0.053 aproximadamente, y observamos que entre mayor sea el valor de  $\Gamma$  la eficiencia disminuye.

En la Fig.(5.19) se muestra la eficiencia capturada de la OWC en función del parámetro de apertura del orificio de descarga  $\theta$  variando el parámetro de propagación de la onda  $\Gamma$ (=0.25, 0.50, 0.75 y 1.0) y fijando el valor de la amplitud incidente  $A_i = 0.03\text{m}$  y los parámetros de  $\mu=0.3$  y  $\omega=0.448$ . Se observa que el parámetro de propagación de la onda con  $\Gamma=1$  y  $\theta=25$  tenemos una eficiencia de 0.014. Para  $\Gamma=0.25$  y un  $\theta=25$  obtenemos una eficiencia de 0.035 aproximadamente. Cabe señalar que entre mayor sea  $\theta$  la eficiencia aumentará en un 70.

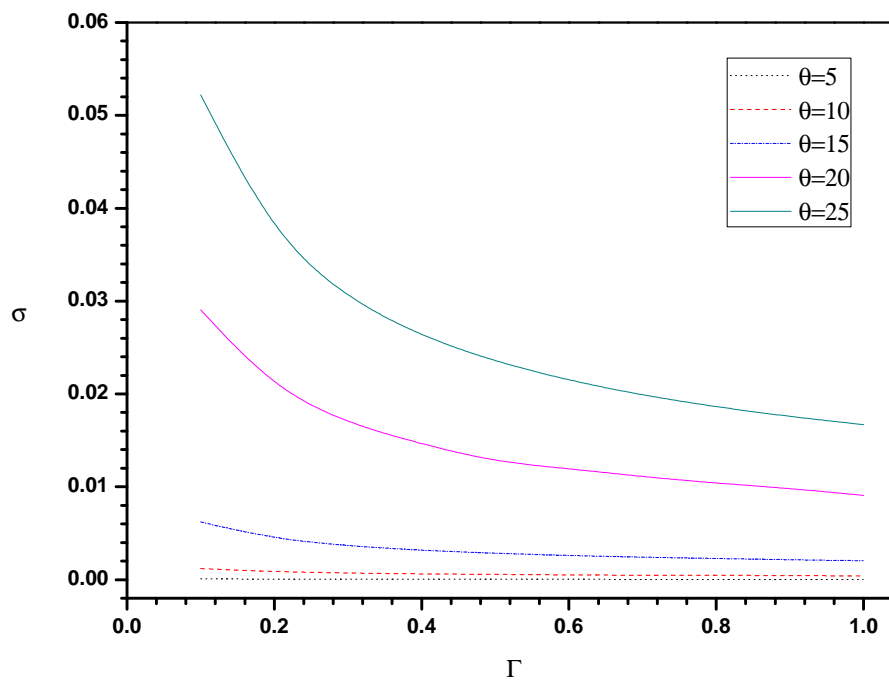


Figura 5.18: Comparación de la eficiencia de captura para diferentes parámetros de apertura del orificio de salida  $\theta$ (=5, 10, 15, 20 y 25) en función del parámetro de propagación de la onda  $\Gamma$  para los parámetros constantes de  $\mu=0.3$ ,  $\omega=0.448$ , y  $A_i=0.03\text{m}$ .



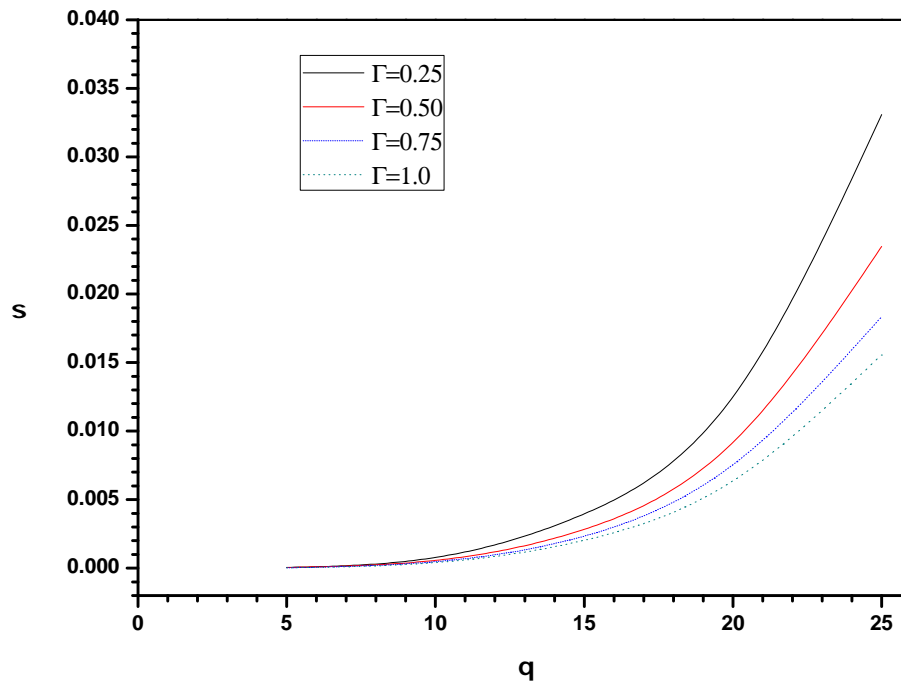


Figura 5.19: Comparación de la eficiencia de captura para diferentes parámetros de propagación de la onda  $\Gamma$  ( $=0.25, 0.50, 0.75$  y  $1$ ) en función del parámetro de apertura del orificio de salida  $\theta$  para los parámetros constantes de  $\mu=0.3$ ,  $\omega=0.448$ , y  $Ai=0.03m$ .



# Capítulo 6

## Conclusiones

Las OWC se han convertido en una tecnología para generar energía eléctrica a través de las olas del mar. Muchos países en el mundo están rodeados de costas pero con potencial energético menor a otras zonas. Con ayuda de diversas investigaciones se pueden adaptar a zonas con potenciales bajos y aún así generar electricidad. En este trabajo se obtuvo el modelo matemático que describe el comportamiento termodinámico del aire dentro de la cámara. Además de que se resolvió de forma numérica y analítica dicho modelo. Se realizó un estudio de optimización paramétrico de la cámara de aire de una OWC concluyendo lo siguiente:

1. Cuando  $\theta$  es mayor en este caso  $\theta=25$  la velocidad de descarga del aire alcanza un valor máximo aproximadamente de  $vd=7\text{m/s}$ , esto debido a que el orificio de descarga disminuye en relación al ancho de la estructura de la OWC. Se debe mencionar que no siempre será lo mejor tener un parámetro  $\theta$  mayor debido a que el flujo volumétrico a través del orificio es de suma importancia para obtener una mayor potencia posible. La presión manométrica obtenida en la cámara de aire tenemos que cuando  $\theta=25$  la presión manométrica es aproximadamente de  $P=(60\text{ y }80)\text{Pa}$ . Observamos que el parámetro  $\theta$  es de suma importancia ya que el orificio de descarga dependerá de la velocidad de descarga, flujo volumétrico y la presión manométrica generada. La potencia máxima capturada de la OWC con  $\theta=25$  oscila entre 0.7 y 0.9 W, mientras con un  $\theta=5$  obtuvimos una potencia de 0.012 W, por lo tanto el parámetro de  $\theta=25$  resultó ser el más óptimo ya que el flujo volumétrico de salida del aire y la presión manométrica obtenida fueron mayores a comparación de  $\theta=(5, 10, 15, 20)$ .

2. Variando el parámetro  $\mu$ , obtuvimos que la potencia máxima capturada de la OWC de 0.46 y 0.36 W aproximadamente con  $\mu=0.14$ , esto quiere decir que la altura de la pared sumergida es de 0.14m en relación a la altura media del agua que es de 1m de altura. El flujo volumétrico de entrada del agua es mayor con este parámetro ya que con una altura de la pared sumergida de 0.50m obtuvimos una potencia de 0.2W. La altura de la pared sumergida debe ser de suma importancia ya que de esta depende la cantidad de flujo que entra a la OWC así como la oscilación que se produzca dentro.

3. El parámetro de propagación de la onda es muy importante en este estudio ya que relaciona el ancho de la onda propagada con el ancho de la OWC. Al tener un  $\Gamma=1$  observamos que la potencia máxima capturada para dicho valor es de 0.8 W. Al tener un  $\Gamma=0.25$  tenemos un  $2H=1\text{m}$  y el ancho de la onda es de 4m. Al tener este parámetro del flujo de entrada es 4 veces mayor y por lo tanto la potencia capturada máxima se eleva a 3.5 y 2.6 W aproximadamente. Con estos valores de potencia concluimos que el parámetro  $\Gamma$  es de gran influencia para la obtención de la potencia de la OWC.

4. Para el análisis en CFD una condición importante es saber si el flujo es compresible o incompresible. Las velocidades al ser de  $Ma < 0.3$  tomamos como flujo incompresible. La afectación del fluido comienza al tener valores del parámetro  $\theta > 50$ . Observamos que al tener estos valores, los flujos comienzan a tener una diferencia en la presión debido a que el orificio de descarga es mucho menor con valores debajo de 0.02m. Al tener dichos valores para el orificio la velocidad de descarga aumenta hasta obtener valores con un  $Ma > 0.3$  considerándolo ya como flujo compresible.

Para la optimización de la cámara de aire sabemos que los parámetros de  $\theta$  y  $\Gamma$  son de gran importancia. Al obtener un  $\theta=25$ ,  $\Gamma=0.25$  observamos que la eficiencia de la OWC es mayor alcanzando eficiencia de 0.035 aproximadamente. Se realizó el estudio paramétrico y se concluyó que fijando los parámetros de  $\theta=25$ ,  $\Gamma=0.25$ ,  $\mu=0.3$ ,  $\omega=0.448$  y el valor de la amplitud incidente de  $Ai=0.03\text{m}$  fueron los más óptimos planteando los dichos parámetros ya que se

alcanzó una eficiencia máxima de 0.035.

# Bibliografía

- [1] S.A. Sannasiraj and V. Sundar. Assessment of wave energy potential and its harvesting approach along the indian coast. *Renewable Energy*, 99:398 – 409, 2016.
- [2] João Cruz. *Ocean wave energy: current status and future perspectives*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] Silvia Bozzi, Giovanni Besio, and Giuseppe Passoni. Wave power technologies for the mediterranean offshore: Scaling and performance analysis. *Coastal Engineering*, 136:130 – 146, 2018.
- [4] Ye Li and Yi-Hsiang Yu. A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6):4352 – 4364, 2012.
- [5] De-Zhi Ning, Xuan-Lie Zhao, Ming Zhao, Martyn Hann, and Hai-Gui Kang. Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon wec-type breakwater. *Applied Ocean Research*, 65:102 – 111, 2017.
- [6] F de O Antonio. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3):899–918, 2010.
- [7] Shaswat Saincher and Jyotirmay Banerjee. Influence of wave breaking on the hydrodynamics of wave energy converters: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58:704 – 717, 2016.
- [8] Kjell Budal, Johannes Falnes, Lars Christian Iversen, Per Magne Lillebekken, Geirmund Oltedal, Tormod Hals, Tor Onshus, and Arne S Høy. The norwegian wave-power buoy project. 1982.
- [9] Mohammad Hossein Jahangir, Seyed Sina Hosseini, and Mehdi Mehrpooya. A detailed theoretical modeling and parametric investigation of potential power in heaving buoys. *Energy*, 154:201 – 209, 2018.
- [10] Ross Henderson. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the pelamis wave energy converter. *Renewable energy*, 31(2):271–283, 2006.
- [11] Eugen Rusu and C. Guedes Soares. Coastal impact induced by a pelamis wave farm operating in the portuguese nearshore. *Renewable Energy*, 58:34 – 49, 2013.
- [12] H Soerensen, E Friis-Madsen, W Panhauser, D Dunce, J Nedkvintne, P Frigaard, Jens Peter Kofoed, W Knapp, S Riemann, E Holmén, et al. Development of wave dragon from scale 1: 50 to prototype. In *Proc. 5th Euro. Wave Energy Conf. Cork: HMRC*, pages 110–116, 2003.
- [13] Alain Clément, Pat McCullen, António Falcão, Antonio Fiorentino, Fred Gardner, Karin Hammarlund, George Lemonis, Tony Lewis, Kim Nielsen, Simona Petroncini, et al. Wave energy in europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5):405–431, 2002.
- [14] AE Fredriksen. Tapered channel wave power plants. In *Energy for Rural and Island Communities: Proceedings of the Fourth International Conference Held at Inverness, Scotland, 16–19 September 1985*, pages 179–182. Elsevier, 1986.
- [15] DRB Kraemer, COG Ohl, and ME McCormick. Comparison of experimental and theoretical results of the motions of a mccabe wave pump. In *Proc. 4th European Wave Energy Conference, Aalborg University, Denmark*, 2000.
- [16] TJT Whittaker and TP Stewart. An experimental study of nearshore and shoreline oscillating water columns with harbours. In *European Wave Energy Symposium*, volume 1, pages 283–294, 1993.

- [17] João C. C. Henriques António F. O. Falcão. Oscillating water column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 85:1391 – 1424, 2016.
- [18] K. Rezanejad, J. Bhattacharjee, and C. Guedes Soares. Analytical and numerical study of dual-chamber oscillating water columns on stepped bottom. *Renewable Energy*, 75:272 – 282, 2015.
- [19] A. Mendonça, J. Dias, E. Didier, C.J.E.M. Fortes, M.G. Neves, M.T. Reis, J.M.P. Conde, P. Poseiro, and P.R.F. Teixeira. An integrated tool for modelling oscillating water column (owc) wave energy converters (wec) in vertical breakwaters. *Journal of Hydro-environment Research*, 19:198 – 213, 2018.
- [20] Brian Winship, Alan Fleming, Irene Penesis, Mark Hemer, and Gregor Macfarlane. Preliminary investigation on the use of tank wall reflections to model wec array effects. *Ocean Engineering*, 164:388 – 401, 2018.
- [21] Yi-Chih Chow, Yu-Chi Chang, Da-Wei Chen, Chen-Chou Lin, and Shiao-Yih Tzang. Parametric design methodology for maximizing energy capture of a bottom-hinged flap-type wec with medium wave resources. *Renewable Energy*, 126:605 – 616, 2018.
- [22] E. Medina-López, A. Monino, A.G.L. Borthwick, and M. Clavero. Thermodynamics of an owc containing real gas. *Energy*, 135:709 – 717, 2017.
- [23] Nader Dizadji and Seyed Ehsan Sajadian. Modeling and optimization of the chamber of owc system. *Energy*, 36(5):2360 – 2366, 2011.
- [24] Paulo R.F. Teixeira, Djavan P. Davyt, Eric Didier, and Ruben Ramalhais. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on navier stokes equations. *Energy*, 61:513 – 530, 2013.
- [25] Frank M. White. *Fluids Mechanics*. McGraw Hill Series in Mechanical Engineering, 7th edition, 2009.
- [26] E. Benjamin Wylie Victor L. Streeter. *Mecánica de Fluidos*. McGraw Hill, 9th edition, 2009.
- [27] I. Simonetti, L. Cappietti, H. Elsafti, and H. Oumeraci. Evaluation of air compressibility effects on the performance of fixed owc wave energy converters using cfd modelling. *Renewable Energy*, 119:741 – 753, 2018.
- [28] Yunus A Cengel, Robert H Turner, John M Cimbala, and Mehmet Kanoglu. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*. McGraw-Hill New York, 2008.
- [29] James R Welty, Charles E Wicks, Robert E Wilson, Concepción Calderón Acosta, et al. *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. 1982.
- [30] PK Kundu and LM Cohen. Fluid mechanics, 638 pp. *Academic, Calif*, 1990.
- [31] Robert G Dean and Robert A Dalrymple. *Water wave mechanics for engineers and scientists*, volume 2. World Scientific Publishing Company, 1991.
- [32] Thomas Vyzikas, Samy Deshoulières, Olivier Giroux, Matthew Barton, and Deborah Greaves. Numerical study of fixed oscillating water column with rans-type two-phase cfd model. *Renewable Energy*, 102:294 – 305, 2017.
- [33] De-Zhi Ning, Rong-Quan Wang, Ying Gou, Ming Zhao, and Bin Teng. Numerical and experimental investigation of wave dynamics on a land-fixed owc device. *Energy*, 115:326 – 337, 2016.
- [34] I. Simonetti, L. Cappietti, H. Elsafti, and H. Oumeraci. Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric owc devices: A numerical study. *Energy*, 139:1197 – 1209, 2017.
- [35] Aggelos S. Dimakopoulos, Mark J. Cooker, and Tom Bruce. The influence of scale on the air flow and pressure in the modelling of oscillating water column wave energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 19:272 – 291, 2017.
- [36] Yongyao Luo, Zhengwei Wang, Guangjie Peng, Yexiang Xiao, Liming Zhai, Xin Liu, and Qi Zhang. Numerical simulation of a heave-only floating owc (oscillating water column) device. *Energy*, 76:799 – 806, 2014.